

F. Fuso – Dipartimento di Fisica Università di Pisa
Consorzio Nazionale Interuniv. Scienze Fisiche della Materia - CNISM
Istituto Nazionale Fisica della Materia – INFN/CNR

C'è tanto spazio nel piccolo: nanotecnologie e dintorni

There's Plenty of Room at the Bottom

An Invitation to Enter a New Field of Physics



by Richard P. Feynman

Citazione pretenziosa nel titolo!!

This transcript of the classic talk that Richard Feynman gave on December 29th 1959 at the annual meeting of the [American Physical Society](#) at the [California Institute of Technology \(Caltech\)](#) was first published in the February 1960 issue of Caltech's [Engineering and Science](#), which owns the copyright. It has been made available on the web at <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> with their kind permission.

Sommario

- **Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?**
- **Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)**
- **Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?**
- **Come si fa a vedere il piccolo?**
- **Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione**
- **Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:**
 - in elettronica;
 - in ottica;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari
- **Conclusioni**

Cosa intenderò per nanotecnologia

Nanotecnologia:

termine di uso ormai comune
(libri, giornali, pubblicità, ...)



Results 1 - 10 of about 18,800,000 for nanotechnology

Un pò di filologia:

Nano tecnologia

Tutto quello che serve per manipolare la materia in modo da ottenere funzionalità (ad esempio "dispositivi")

Comprende:

Metodi, tecniche, approcci, conoscenze fondamentali, etc.

Coinvolge:

Discipline come fisica, chimica, biochimica, ingegneria, scienza dei materiali, etc.

Cosa è piccolo...

Nano tecnologia



La nanotecnologia implica la manipolazione di materia

I componenti fondamentali della materia (atomi, molecole, etc.) hanno dimensioni tipicamente tra 0.1 e 1 nm

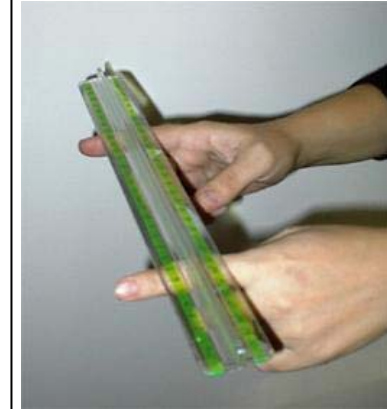
$$1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$$

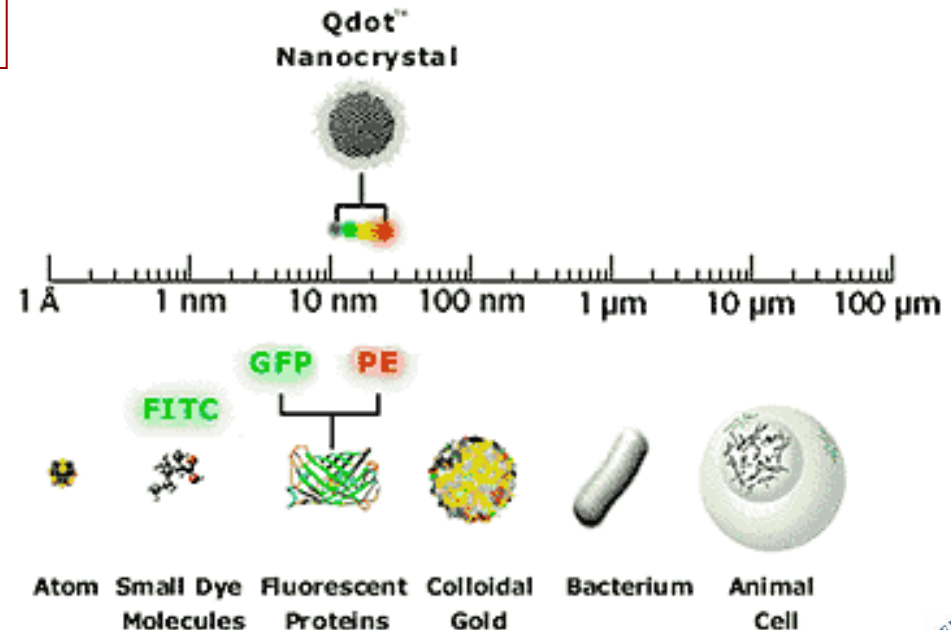
$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$$



“Limite inferiore” della nanotecnologia ~ 1 nm



...non sempre è così piccolo...



Figure 1.2

This image shows the size of the nanoscale relative to things we are familiar with. Each image is magnified 10 times from the image before it. As you can see, the size difference between a nanometer and a person is roughly the same as the size difference between a person and the orbit of the moon.

©2001 Lucia Eames/Eames Office (www.eamesoffice.com)

La nanotecnologia non si rivolge a sistemi di dimensioni atomiche o sub-atomiche

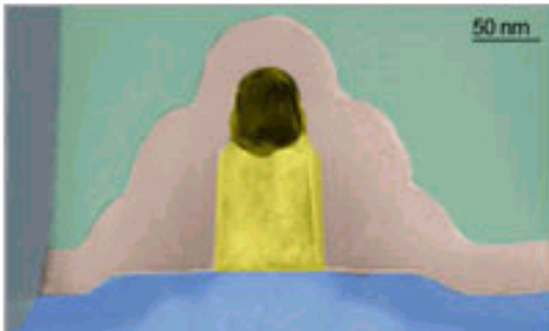
Nota: la chimica e la scienza dei materiali lo fanno! La fisica delle alte energie lo fa (fisica sub-nucleare), per scopi non direttamente attinenti ai dispositivi "di tutti i giorni"

...talvolta per “ragioni tecniche”

Forse non è nanotecnologia, ma ci si avvicina!!

How many transistors can dance on the head of a chip only 66 millimeters square? Over 58 million, thanks to IBM's sophisticated process technology that builds them just 90 nanometers wide. Such superior technology developments turbo-charge the G5 processor to speeds of up to 2.5GHz.

To get electronics so small requires miniaturization breakthroughs, and IBM's dedication to basic scientific research makes these advances possible. For instance, the company began researching copper as an interconnect method over 25 years ago, but the technique wasn't practical until just recently.



One in 58 Million. A transistor just 90nm wide (yellow) on substrate of SOI (blue) with copper interconnects (gray). Layers of nitride (brown) and oxide (green) insulate it from its brethren. Magnified 146,000 times.

<http://www.apple.com>

So Small

Transistors on the PowerPC G5 hold a charge to let the system make logic decisions based on whether the transistor is on or off. Using a 90nm process for even greater performance, IBM builds these devices just .00000009 meters wide on a layer of silicon on insulator. The 58 million transistors themselves are connected by over 400 meters of copper wire that's less than 1/1000th the width of a strand of your hair. Tiny paths mean less time to complete a sequence, since the

Difficile dare un “limite superiore”



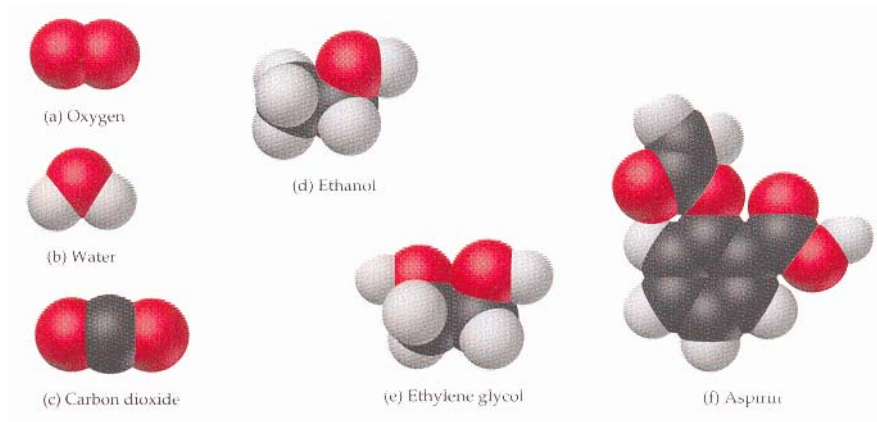
La nanotecnologia ha a che fare con sistemi di dimensioni tipiche fra 1 e 100 nm (circa)

- Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?
- **Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)**
- Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?
- Come si fa a vedere il piccolo?
- Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione
- Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:
 - in elettronica
 - in ottica;;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari
- Conclusioni

Natura e nanotecnologia

Semplici molecole

~0.1 nm



La natura (specie quella vivente) è piena di “oggetti nanotecnologici”!!

La natura costruisce nanostrutture attraverso autoassemblaggio, replicazione, etc., partendo da entità “elementari”

DNA

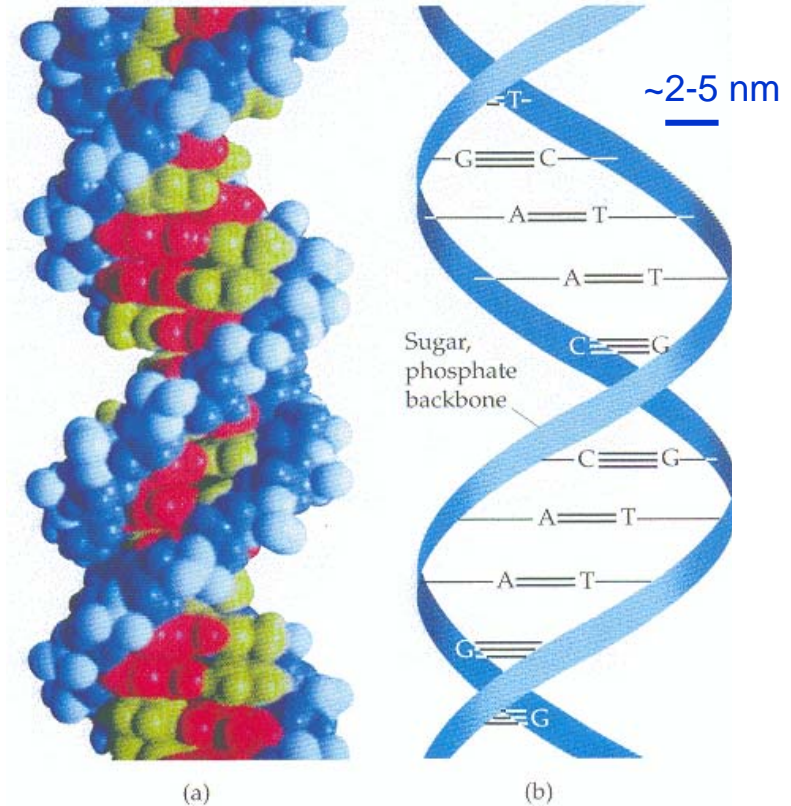


Figure 3.3

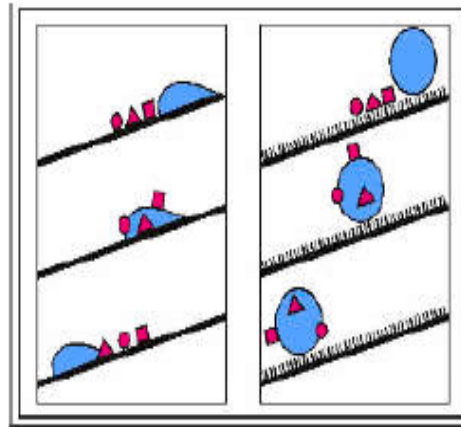
(a) Computer-generated model of the DNA double helix. (b) Schematic showing the actual base pairs linked to each other.

La natura usa un approccio “bottoms-up”

La foglia del loto

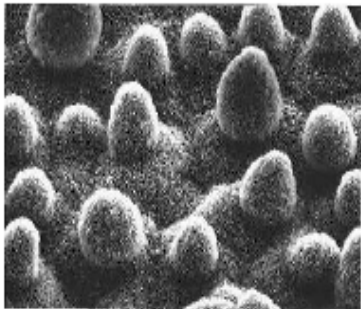


10 mm



W. Barthlott, Univ. of Hamburg

On a smooth surface the contaminating particles are only moved by the water droplet (left). In contrast to that, on a rough surface they stick to the droplet rolling off the leaf thus being washed off (right).



Epicuticular wax



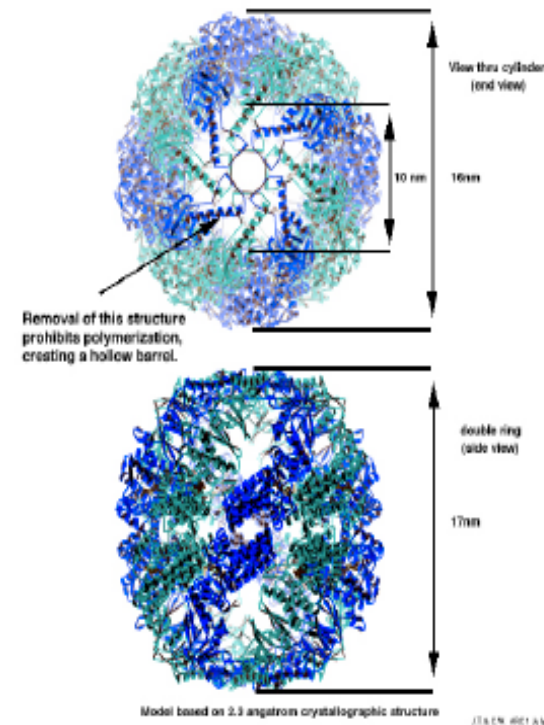
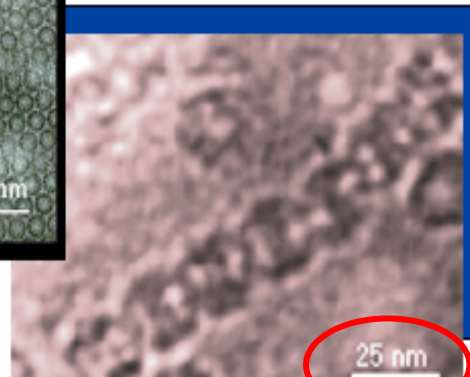
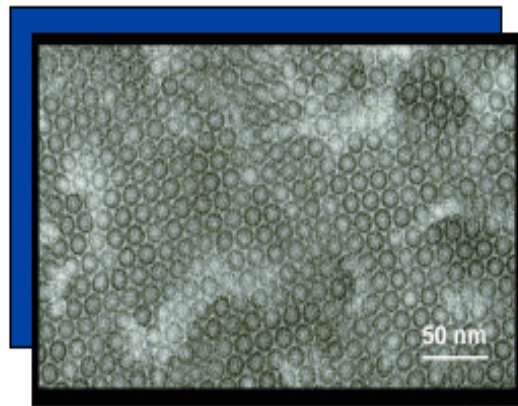
SEM recording of a biologically produced self-cleaning surface.
© Barthlott 08

(Source: Metin Sitti, CMU)

Proprietà funzionali (idrofobia) ottenute da nanostrutturazione superficiale

Una proteina fatta di nanotubi

- Heat shock protein (HSP 60) in organisms living at high temperatures (“extremophiles”) is of interest in astrobiology
- HSP 60 can be purified from cells as a double-ring structure consisting of 16-18 subunits. The double rings can be induced to self-assemble into nanotubes.

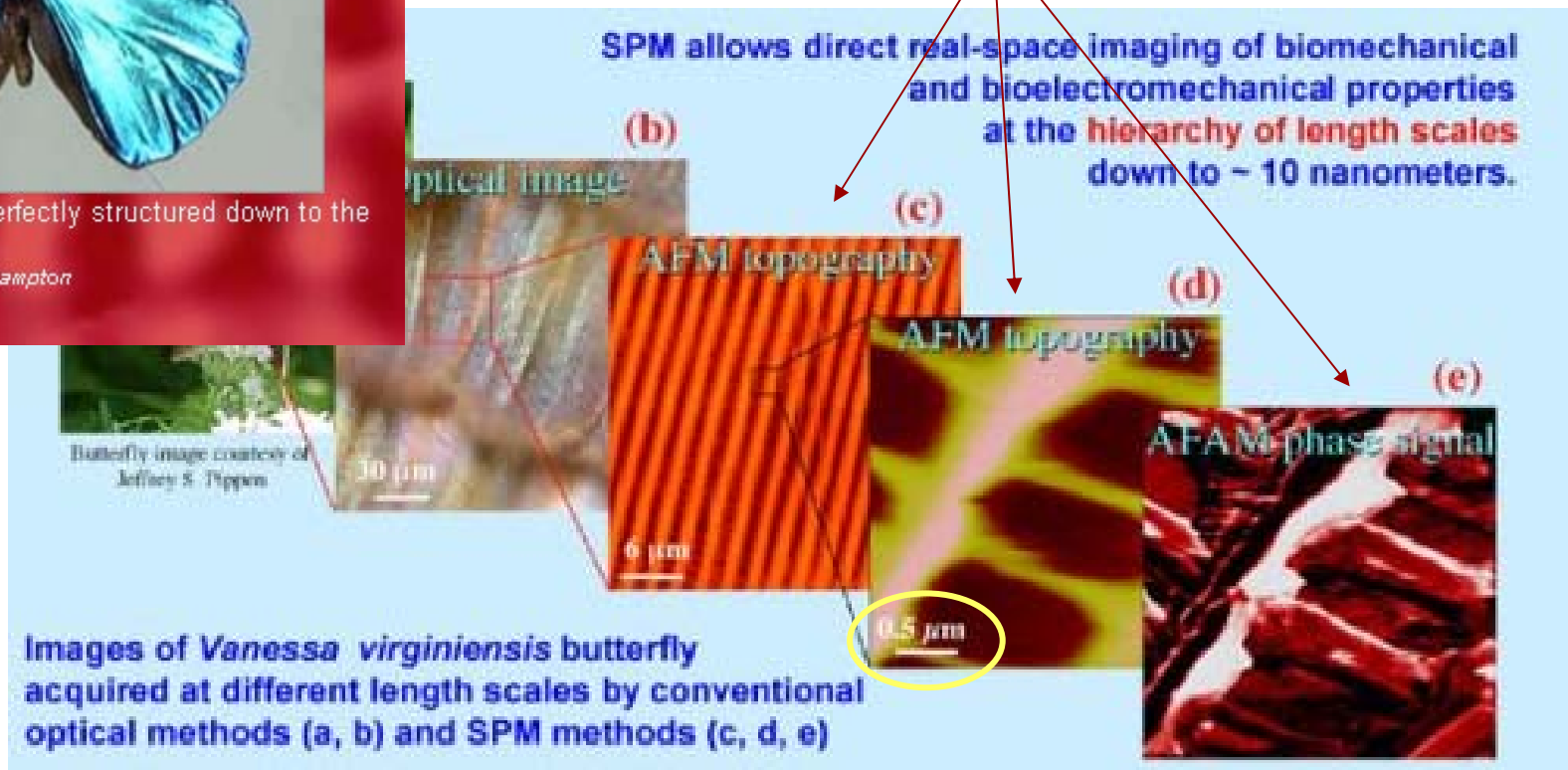


**Proprietà funzionali (resistenza alla temperatura)
ottenute da nanostrutturazione in forma di tubi**

Le ali della farfalla



Occhio! Occorrono microscopi “raffinati” per osservare alla nanoscala!



**Proprietà funzionali (possibilità volo e bellezza alla vista!)
ottenute tramite nanostrutturazione**

Anche l'arte fa la sua parte

Lycurgus Cup in Roman times

Dr. J.

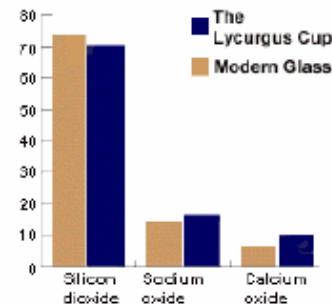
Nanoparticelle di oro e argento hanno uno "strano" comportamento ottico



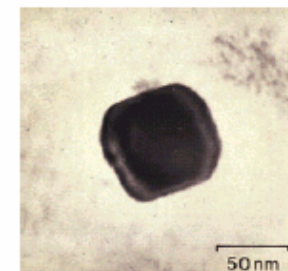
The glass appears green in daylight (reflected light), but red when the light is transmitted from the inside of the vessel.

Mysterious red color in Lycurgus Cup

Dr. Juen-Kai Wang



The same composition as modern glass



X-ray analysis:
70% Ag + 30% Au

These Ag-Au nanoparticles (~300 ppm) scatter the light, rather in the same way that fine particles in the atmosphere cause a 'red sky at night' effect. They cause the color effects shown by the Cup.

The Lycurgus Cup, Roman (4th century AD), British Museum (www.thebritishmuseum.ac.uk)
F. E. Wagner et al., Nature 401, 804 (2000).

Sicuramente la storia dell'arte porta esempi antichi dell'uso umano delle nanotecnologie

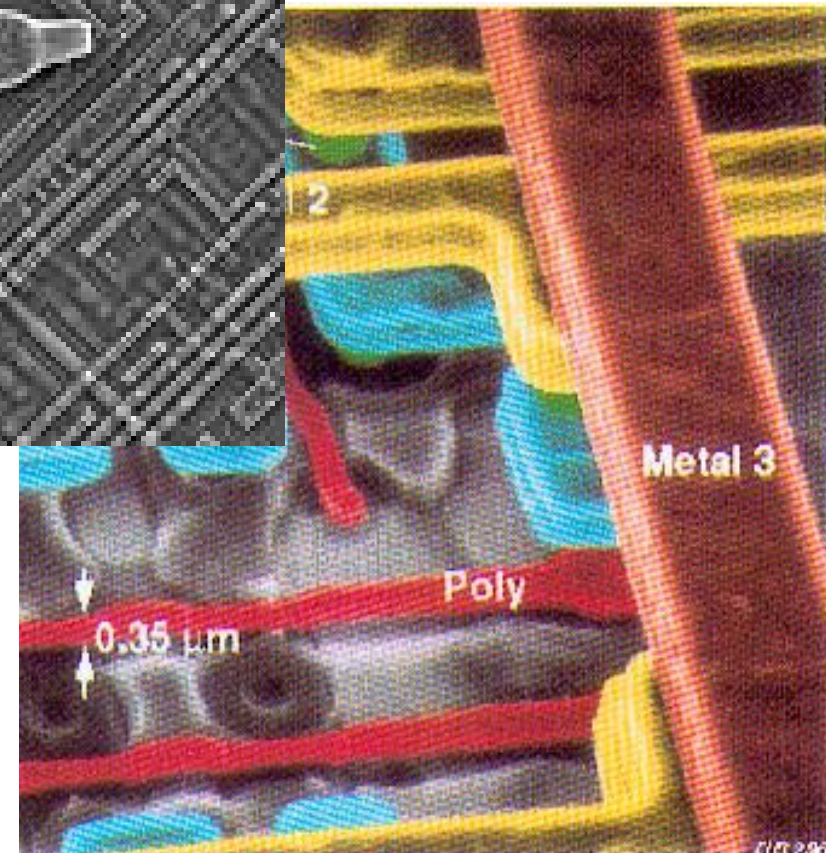
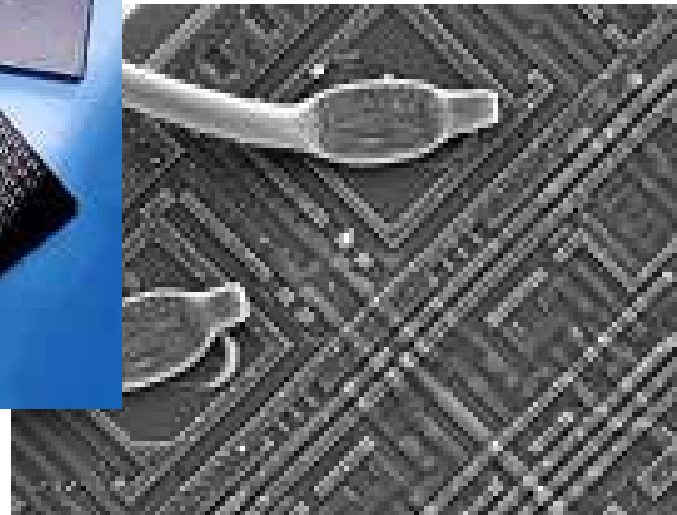
The Lycurgus Cup, Roman (4th century AD), British Museum (www.thebritishmuseum.ac.uk)

- Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?
- Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)
- **Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?**
- Come si fa a vedere il piccolo?
- Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione
- Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:
 - in elettronica
 - in ottica;;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari
- Conclusioni

Chi spinge oggi la ricerca



Un “chip” elettronico è composto da strati sottili di materiali sovrapposti dotati di una *strutturazione laterale* → ottime chances per la miniaturizzazione.



La tecnologia elettronica coinvolge enormi e continui sforzi di miniaturizzazione

Come procedono le cose

Negli anni '80



Scheda di espansione memoria da 512 kB!!
(prezzo? Oltre 1 kE!!!)

Oggi, al supermercato



Scheda di memoria (flash) da 8 GB
(prezzo ~0.1 kE)

X 2.5×10^{-5}

X 1.5×10^4

L'elettronica (specie IT) spinge verso la miniaturizzazione sempre più estrema

(Servira davvero?)



by Richard P. Feynman

How do we write small?

Information on a small scale

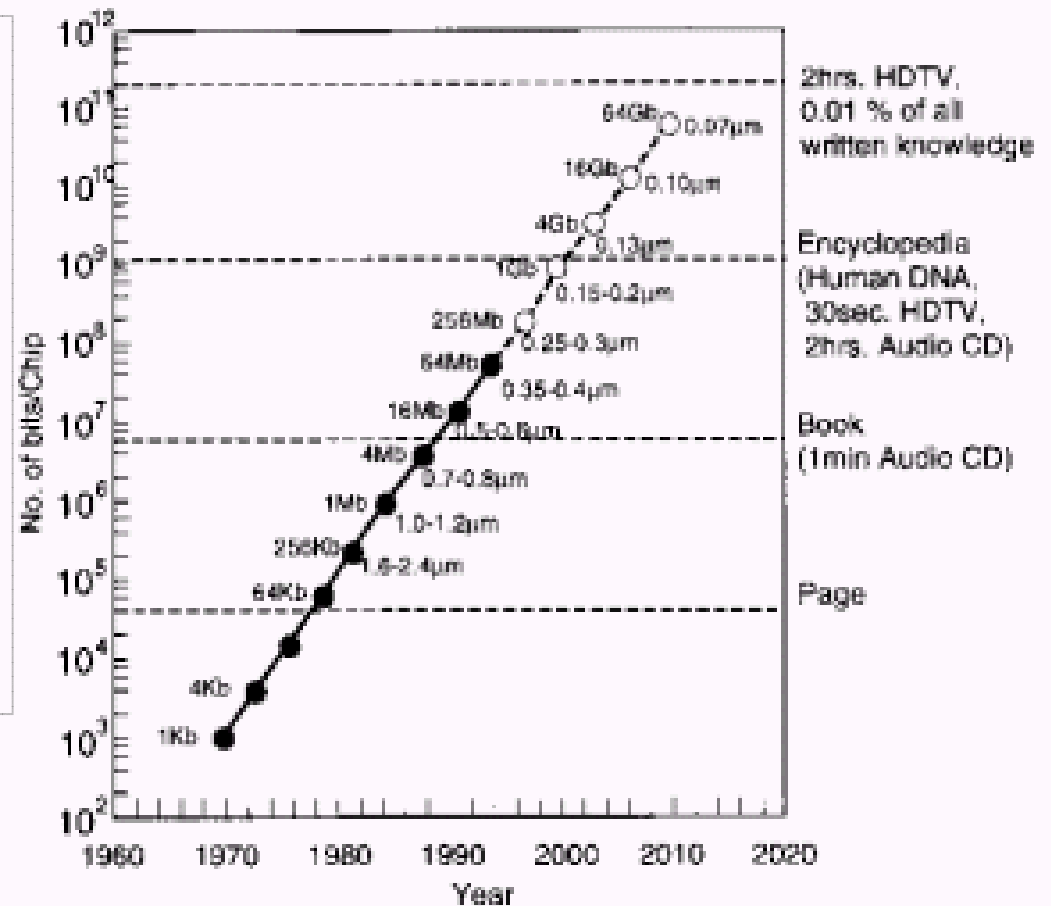
Miniaturizing the computer

Dip pen lithography

As soon as I mention this, people tell me about miniaturization, and how far it has progressed today. They tell me about electric motors that are the size of the nail on your small finger. And there is a device on the market, they tell me, by which you can write the Lord's Prayer on the head of a pin. But that's nothing; that's the most primitive, halting step in the direction I intend to discuss. It is a staggeringly small world that is below. In the year 2000, when they look back at this age, they will wonder why it was not until the year 1960 that anybody began seriously to move in this direction.



Richard P. Feynman, 1960

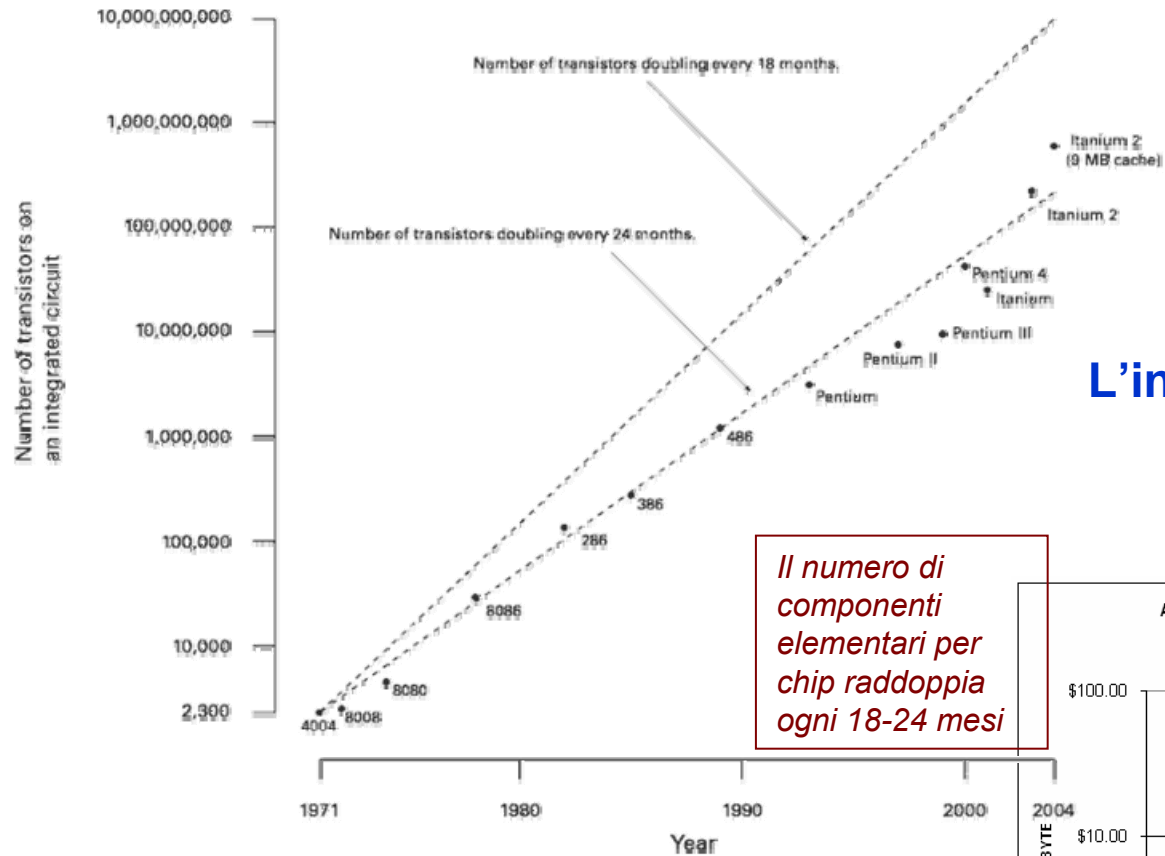


Imperativi tecnologico-commerciali:

- ✓ Immagazzinare in spazi più piccoli
- ✓ Aumentare la potenza di elaborazione



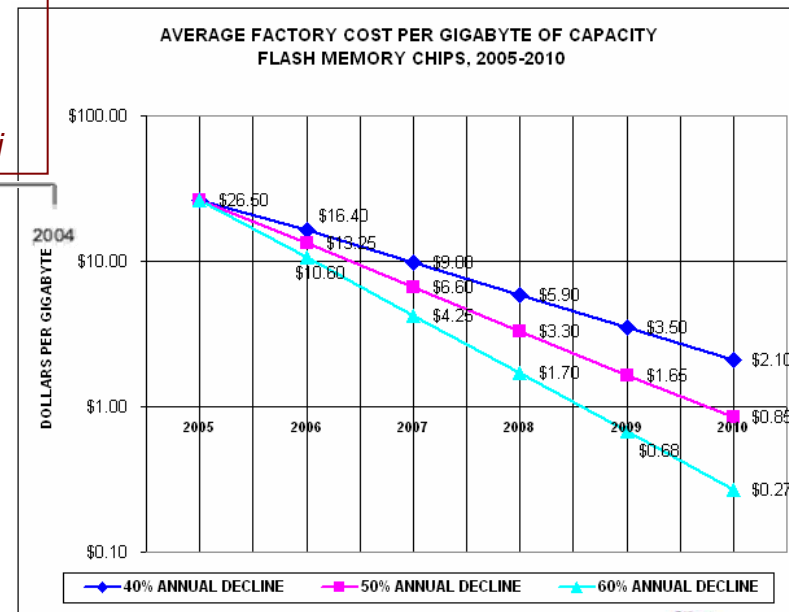
La legge di Moore



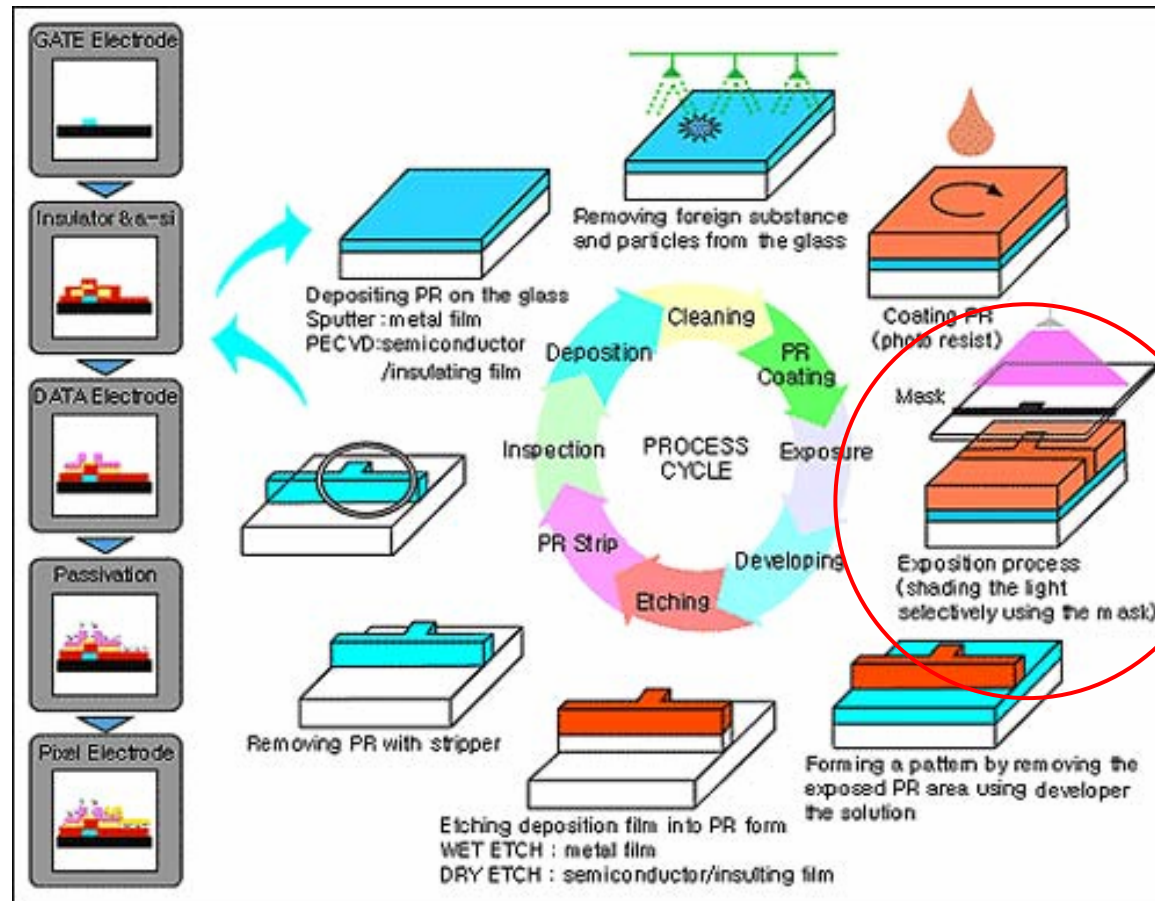
Il numero di componenti elementari per chip raddoppia ogni 18-24 mesi

L'integrazione cresce...

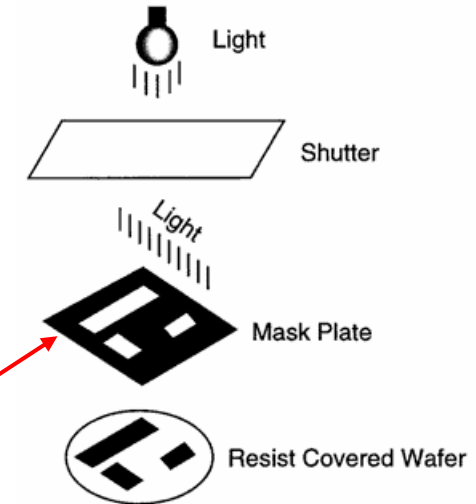
...il costo scende



Come si fa un chip (oggi)



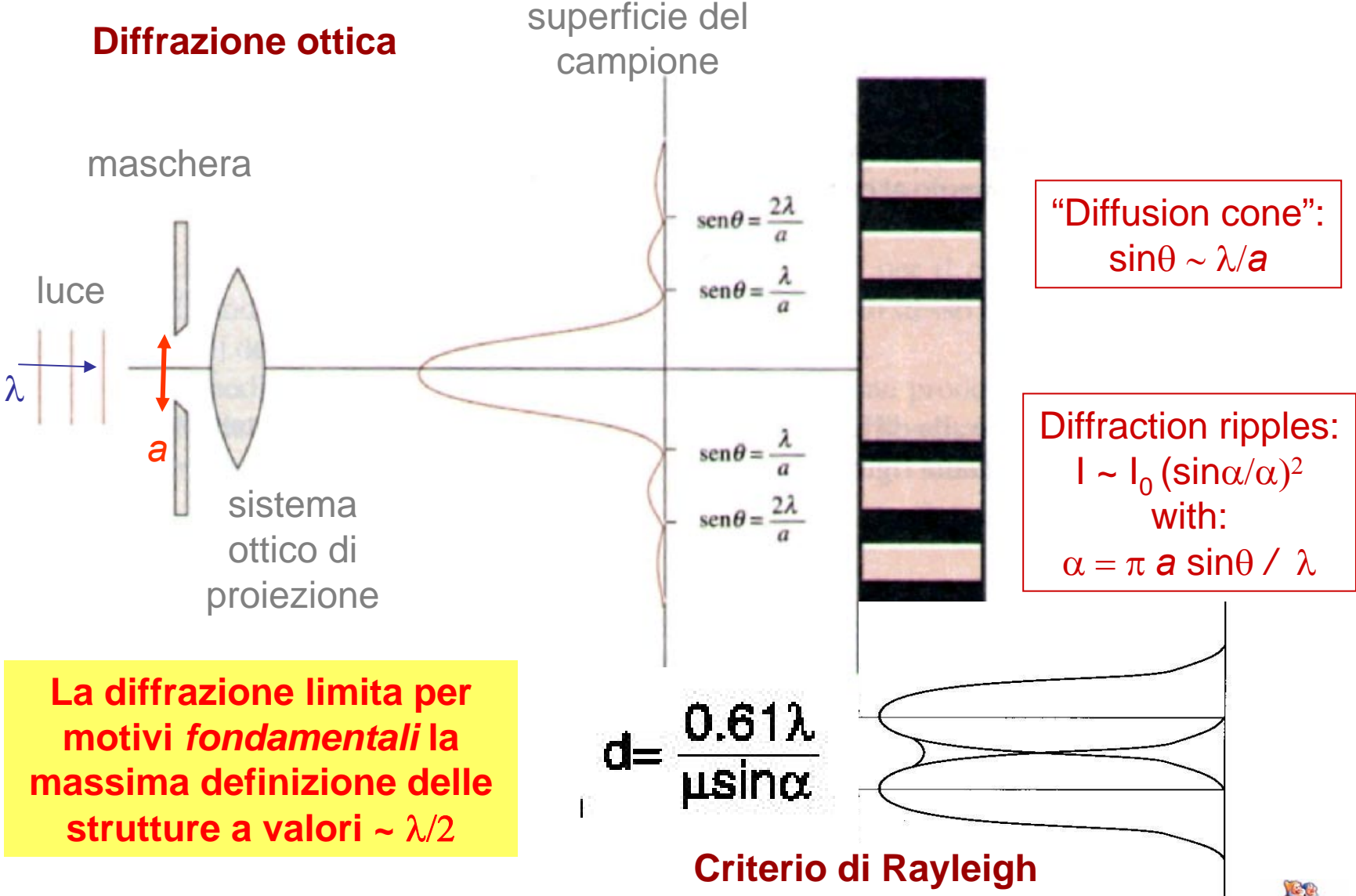
Litografia ottica



La luce, passando attraverso una “maschera”, impressiona il campione. Successivi steps permettono di **rimuovere** il materiale e **definire la struttura**.

La tecnologia (elettronica) attuale è top-down

Problemi!

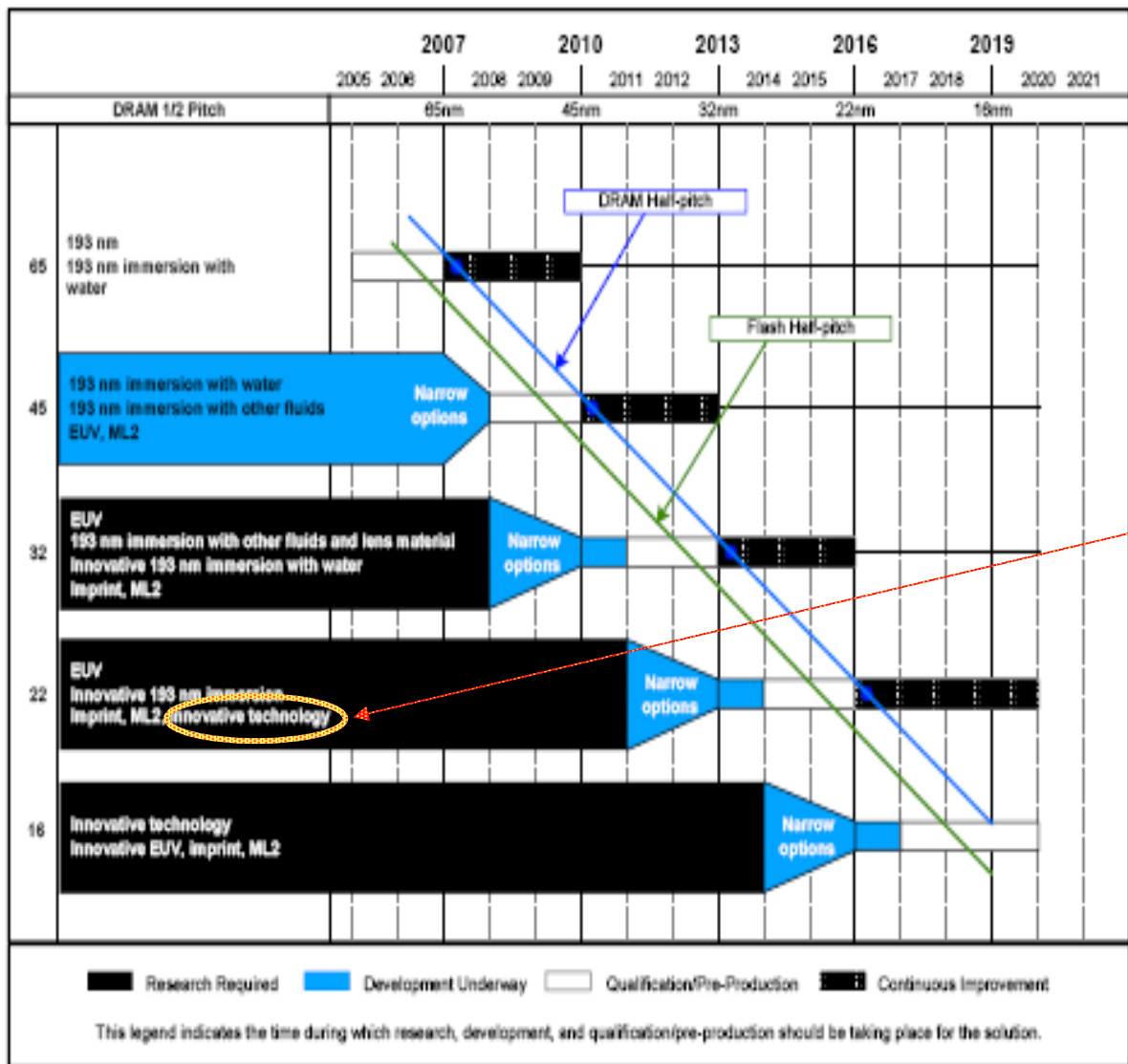


La diffrazione limita per motivi *fondamentali* la massima definizione delle strutture a valori $\sim \lambda/2$



Necessità di innovare

International Semicon Technol Roadmap



Nuove tecnologie dovranno essere sviluppate solo per mantenere il passo della miniaturizzazione nell'elettronica commerciale

<http://public.itrs.net>

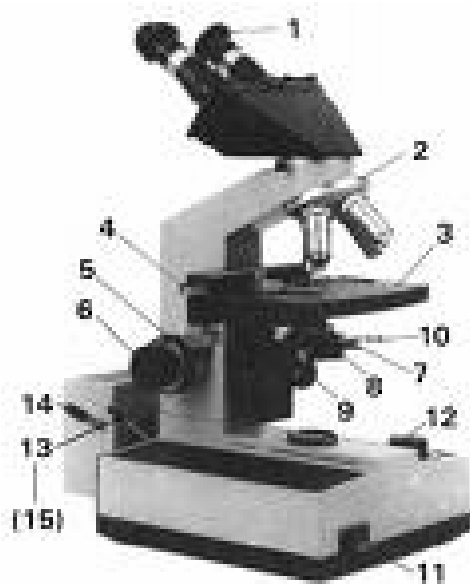
C'è tanto spazio nel piccolo – Pisa, 29/3/07

Le forze motrici



- Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?
- Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)
- Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?
- **Come si fa a vedere il piccolo?**
- Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione
- Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:
 - in elettronica;
 - in ottica;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari
- Conclusioni

Come si vede il piccolo?



Il microscopio ottico soffre dei limiti della diffrazione

Risoluzione massima limitata a circa 200-300 nm!!

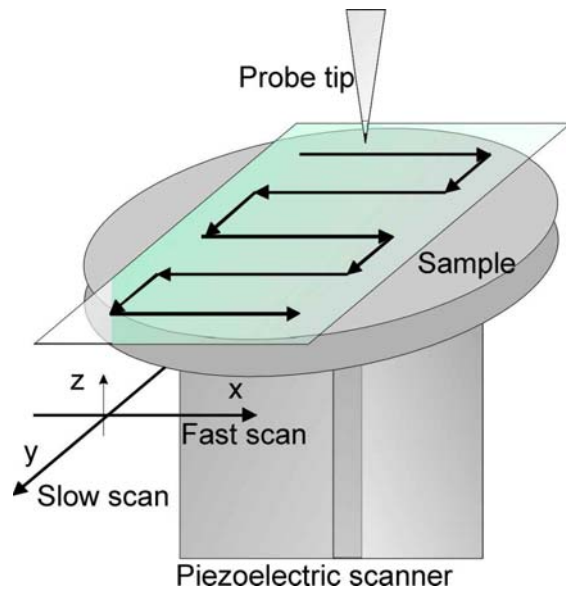


Esiste il **microscopio elettronico**:

- ✓ Altissima risoluzione, ma poche informazioni
- ✓ Complessa interpretazione immagini
- ✓ Spesso distruttivo
- ✓ Non adatto a materiali isolanti

La nanotecnologia richiede nuovi microscopi!!

Sondare nel piccolo



Microscopia a scansione di sonda (SPM):

- Una sonda misura *localmente* una *grandezza fisica* punto per punto mentre la superficie del campione viene scandita con spostamenti subnanometrici
- Un computer ricostruisce l'immagine

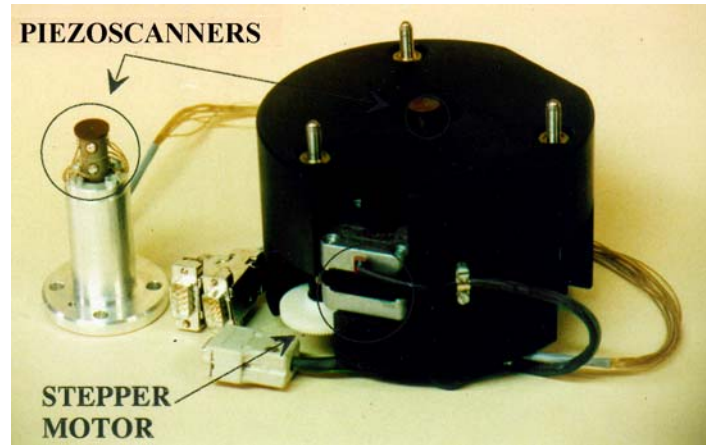
Grandezze fisiche misurabili (quantitativamente) su scala locale

Esempi di SPM:

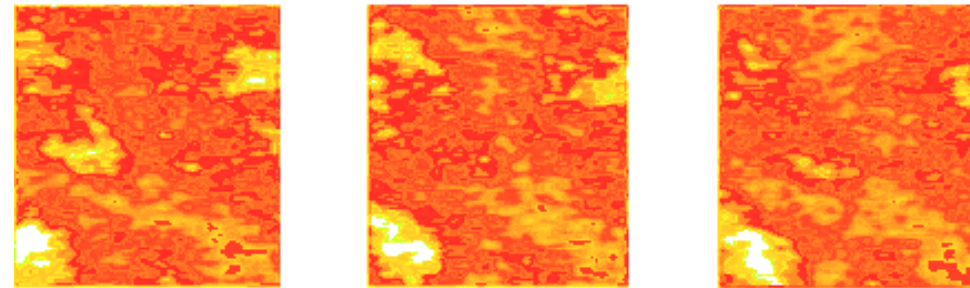
- Microscopio ad effetto tunnel (**STM**): risoluzione subatomica (< 0.1 nm)!
- Microscopio a forza atomica (**AFM**): risoluzione atomica (< 1 nm)
- Microscopio a campo ottico prossimo (**SNOM**): risoluzione sotto diffrazione (~ 10 nm)

Strumenti sofisticati ma semplici!

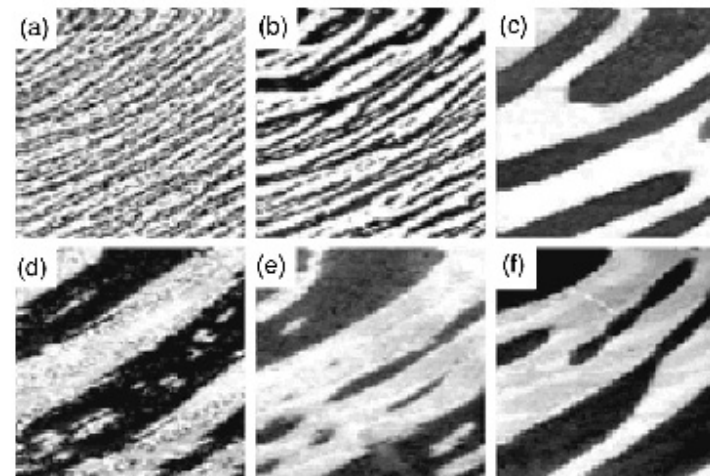
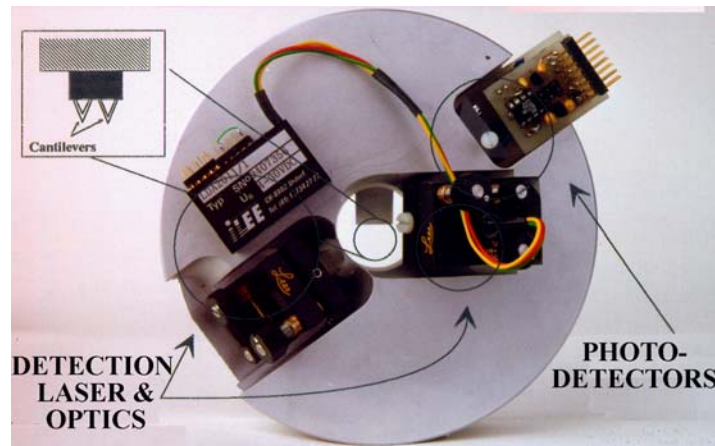
Setup originario



Alcune vecchie immagini



SNOM

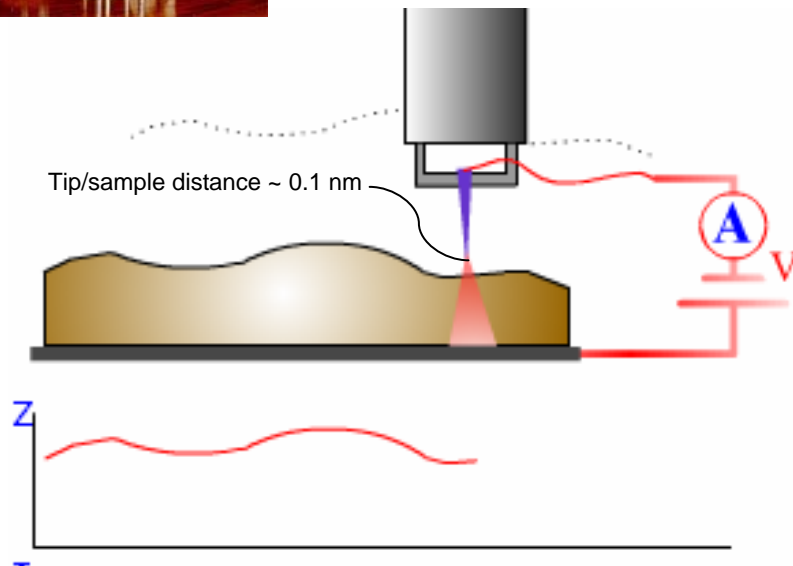


EFM/AFM

Strumenti "pionieristici" realizzati negli anni '90 presso questo Dipartimento
<http://www.df.unipi.it/gruppi/struttura/ma/page.htm>

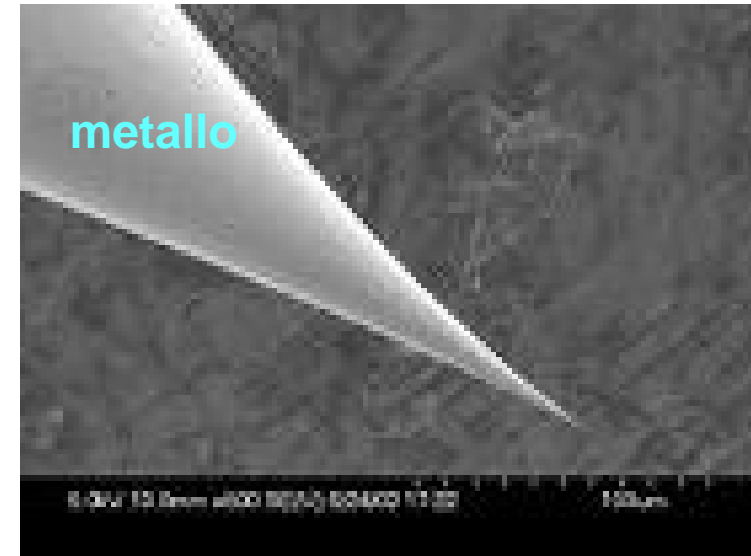
Microscopio ad effetto tunnel (STM)

Binnig, Rohrer, 1986



Un sistema di feedback mantiene costante la corrente durante la scansione \rightarrow la topografia superficiale può essere quantitativamente determinata

Sonda

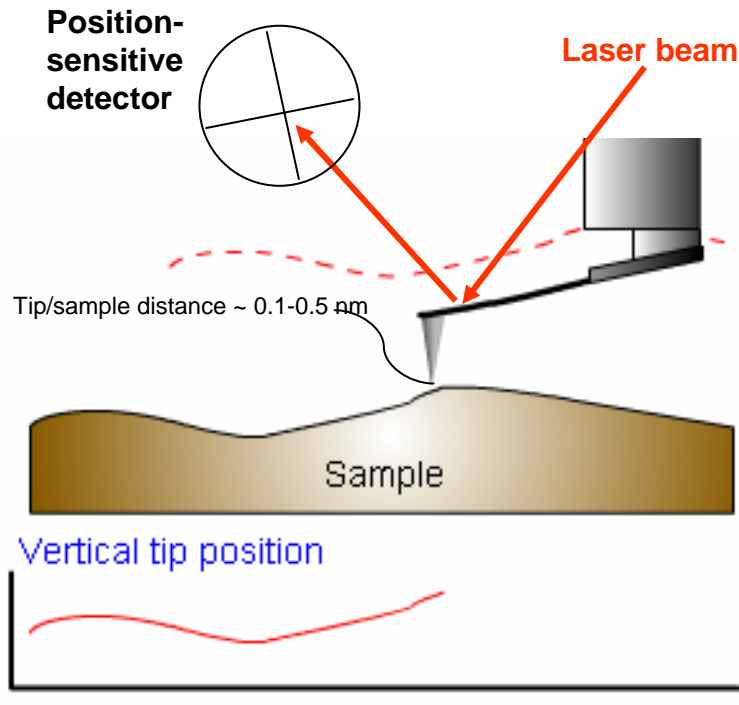


Grandezza fisica misurata:

Corrente che fluisce dalla punta alla superficie (*per effetto tunnel*)

La corrente dipende **esponenzialmente** dalla distanza punta/campione \rightarrow grande sensibilità

Microscopio a forza atomica (AFM)



Un sistema di feedback mantiene costante la deflessione della cantilever durante la scansione → la topografia superficiale può essere quantitativamente determinata

Sonda

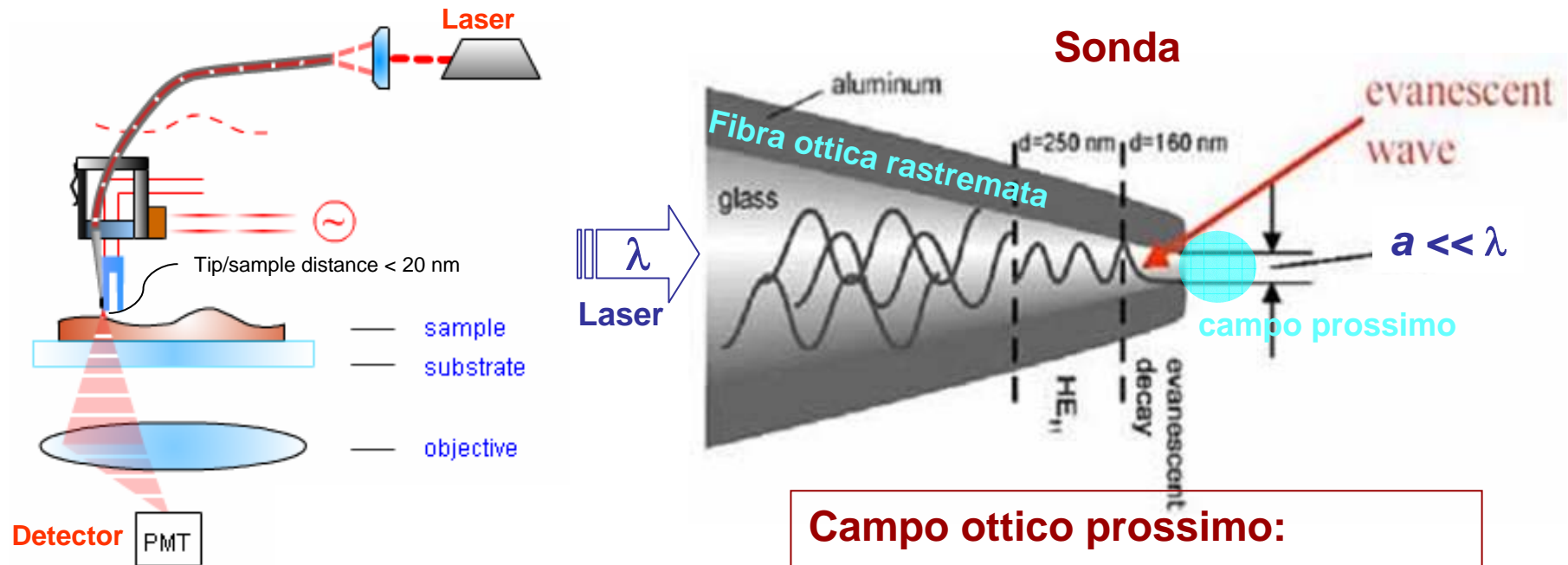


Grandezza fisica misurata:

Interazione meccanica punta/superficie (forze tipo van der Waals)

L'interazione è repulsiva a piccole distanze ($< 0.2 \text{ nm}$), attrattiva a grandi distanze

Microscopio a campo ottico prossimo (SNOM)



La distanza sonda/campione è misurata mantenendo in oscillazione la sonda e tenuta costante da un feedback

Le proprietà ottiche (es., la trasmissione) vengono misurate punto per punto assieme alla topografia

Campo ottico prossimo:

Radiazione elettromagnetica *non propagante* (evanescente) che si estingue in $\sim 20\text{-}100 \text{ nm}$

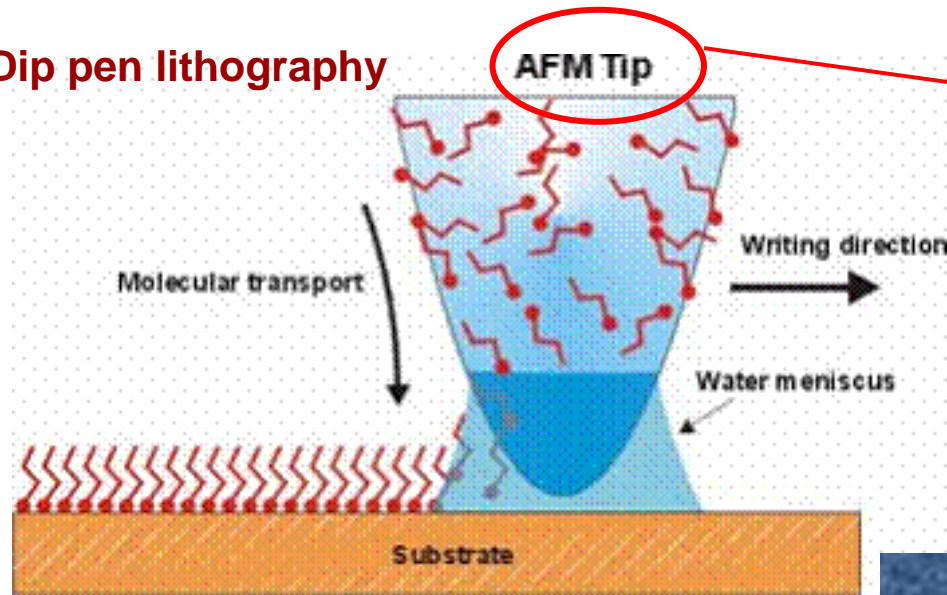
Grandezza fisica misurata:

Interazione ottica tra campo prossimo e superficie del campione (es., riflessione, trasmissione, diffusione)

- Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?
- Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)
- Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?
- Come si fa a vedere il piccolo?
- **Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione**
- Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:
 - in elettronica
 - in ottica;;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari
- Conclusioni

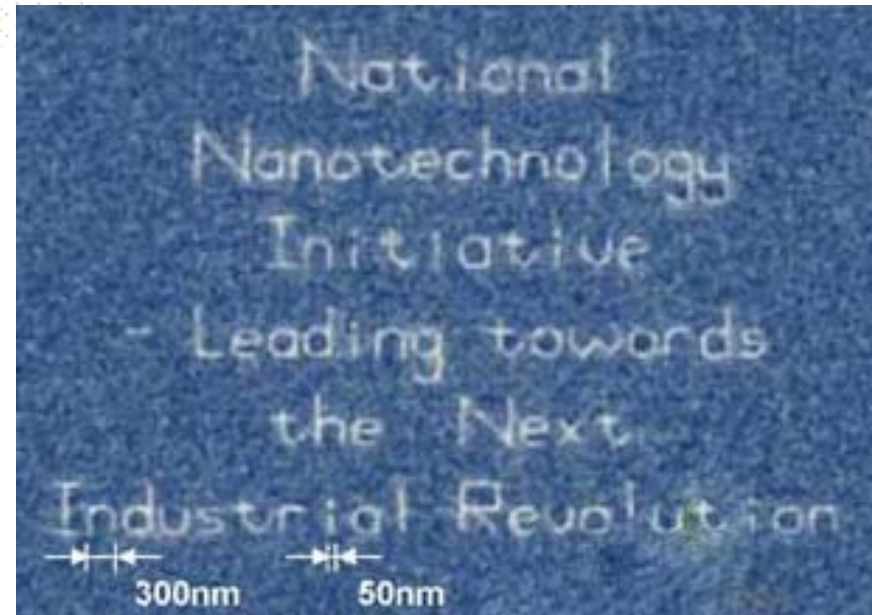
Scrivere con un nanopennino

Dip pen lithography

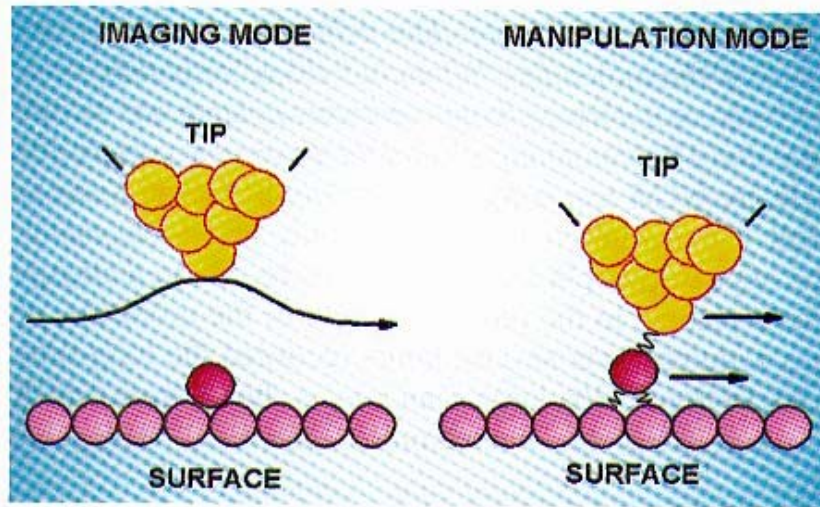


Microscopi a scansione di sonda usati come strumento di nanofabbricazione

Eccellente flessibilità
(ma molto lenta e poco versatile)

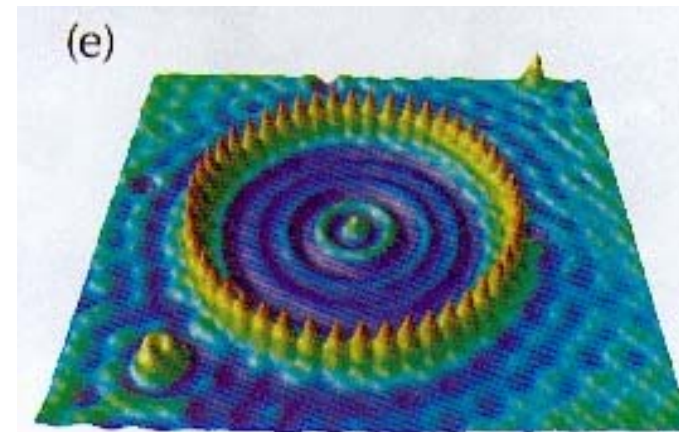
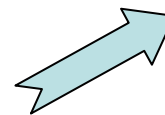
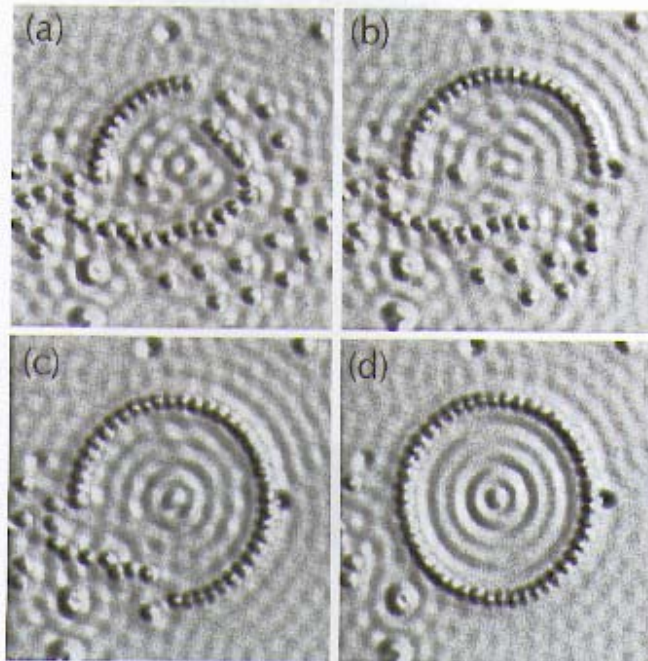


Posizionare gli atomi



Microscopi a scansione di sonda usati come strumento di nanofabbricazione

Singoli atomi posizionati in un *quantum corral*

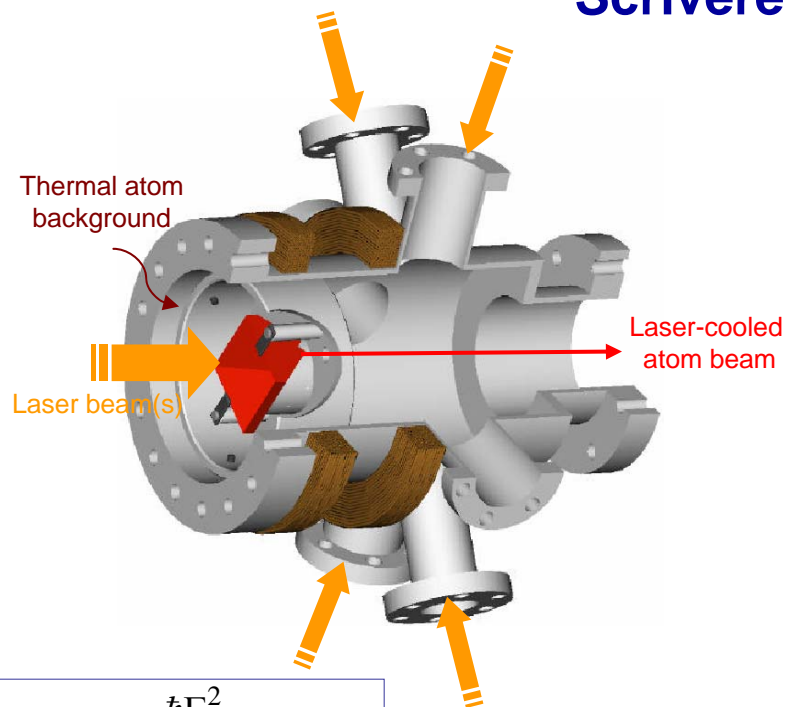


*Sistema quantistico mesoscopico
Media : Iron on Copper (111)*

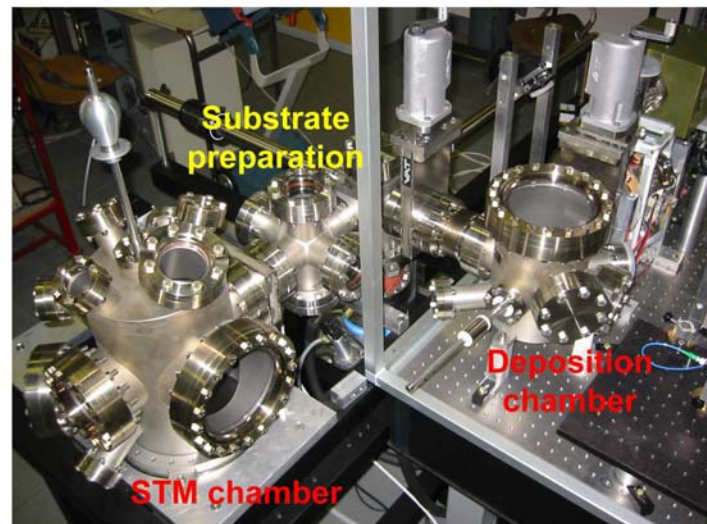
IBM



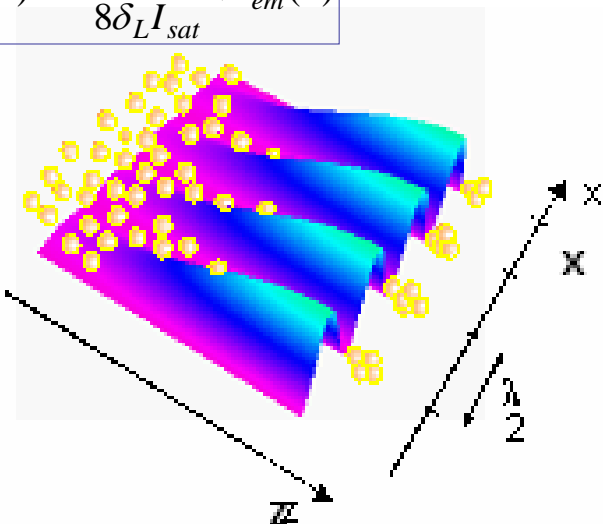
Scrivere con gli atomi I



Nei nostri laboratori...



$$\vec{F}(\vec{r}) = -\frac{\hbar\Gamma^2}{8\delta_L I_{sat}} \vec{\nabla} I_{em}(\vec{r})$$

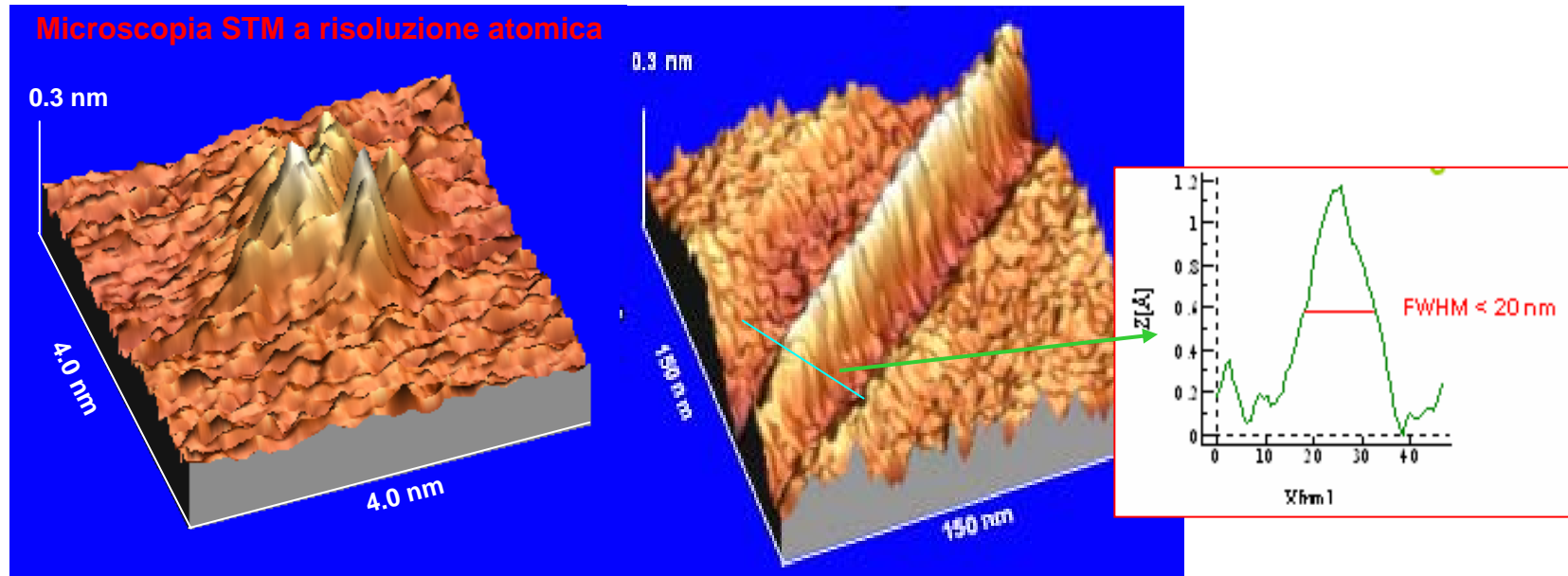


Segregazione spaziale di un fascio di atomi mediante interazione con onda stazionaria unidimensionale quasi risonante
 → array di linee parallele

**Il fascio di atomi ha $\lambda_{deBroglie} < 1 \text{ nm}$
 → la diffrazione non ha effetto!!**



Scrivere con gli atomi II



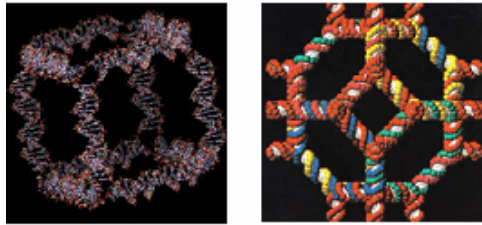
Pochi atomi di cesio su un substrato di grafite

Molti atomi, guidati dal laser, formano una nanolinea

Manipolazione via laser di atomi neutri applicata alla nanofabbricazione con approccio *top-down*

“Ispirarsi” alla biologia

Strutture supramolecolari

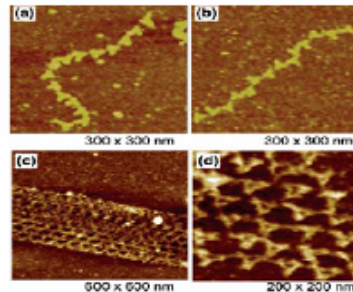
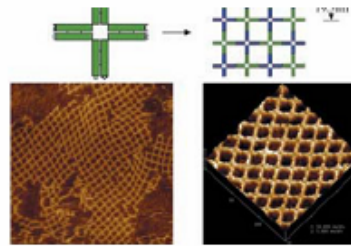


Chen et al. *Nature* 350, 631-633 (1991)

Zhang, Y. W. and N. C. Seeman (1994).
JACS 116(5): 1661-1669.

Yan, H., S. H. Park, et al. (2003).
Science 301(5641): 1882-1884.

Liu, D., et al. (2004).
JACS 126(8): 2324-2325

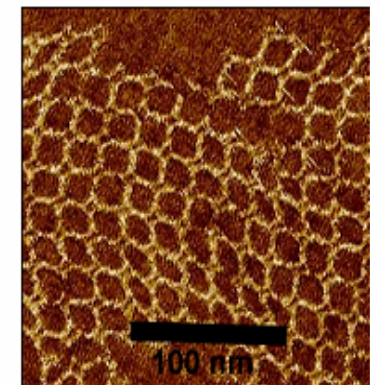


Le possibilità di “funzionalizzare” molecole complesse (es. DNA) possono essere sfruttate per realizzare “impalcature molecolari”

Autoassemblaggio di impalcature molecolari

Impalcature autoassemblate usate come pattern per nanodispositivi (ancora da realizzare!)

Le molecole di DNA vengono assemblate in strutture ordinate periodiche, a cui associare successivamente i dispositivi. Questi saranno poi interconnessi tra di loro da nanocavi.

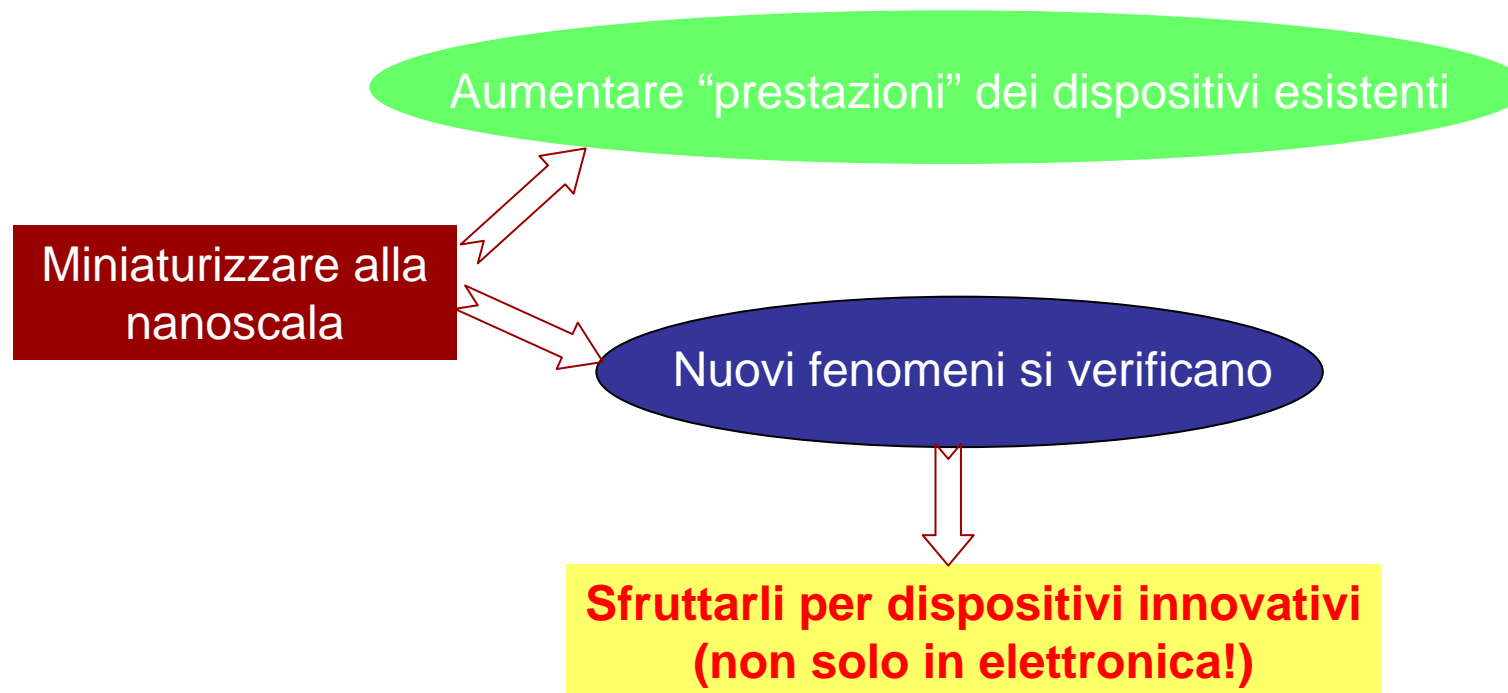


- Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?
- Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)
- Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?
- Come si fa a vedere il piccolo?
- Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione
- **Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:**
 - in elettronica;
 - in ottica;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari
- Conclusioni

Perché vale la pena?

Se lo scopo di miniaturizzare fosse solo quello di aumentare le prestazioni di computer, telefonini, televisori non varrebbe la pena di investire tanti sforzi...

Ma esiste la possibilità di accedere a **nuove funzionalità** quando le dimensioni diventano nanometriche!!



Superficie vs volume

Prova a fare questo
eSercizio:

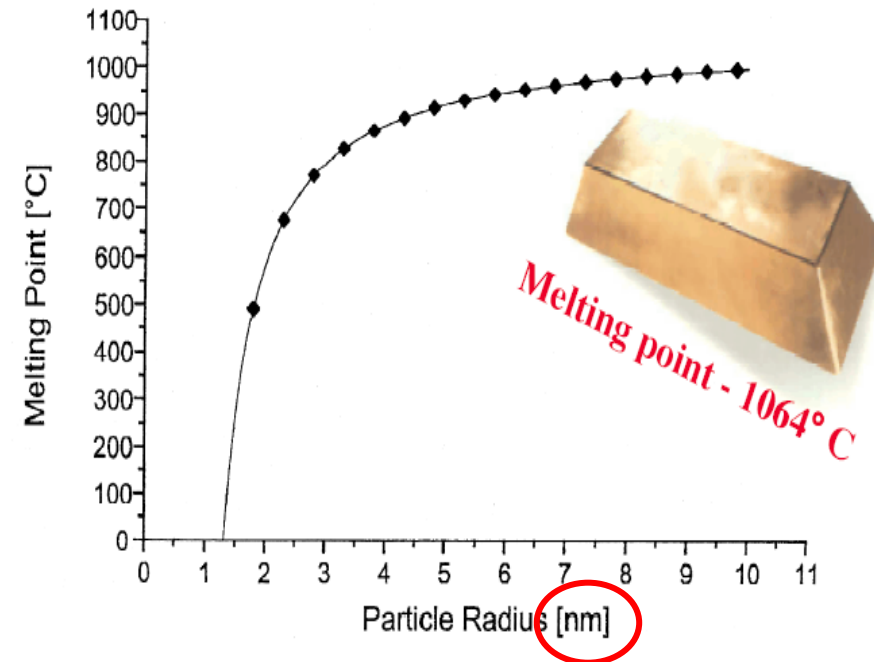


- Quanti lati ha un cubo?
- Se il lato misura 1 cm, qual è la superficie totale del cubo?
- Tagliando il cubo tre volte (verticalmente, orizzontalmente e trasversalmente), quanti cubi si ottengono?
- Qual è la misura di ogni nuovo cubo? Qual è la superficie totale di tutti i cubi ottenuti?

Vedrai che a parità di peso (o, meglio, di massa), **più piccolo significa maggior superficie**

Nel mondo nanoscopico la superficie diventa sempre più “importante” rispetto al volume

Temperatura di fusione dell'oro

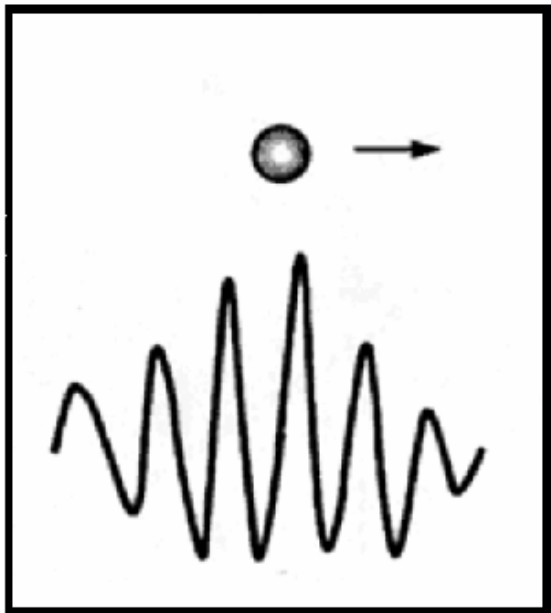


Source: K.J. Klabunde, 2001

Fusione ed evaporazione coinvolgono soprattutto la superficie



Onde di materia



Wave Particle Duality

In our world we know that objects, particularly small round hard objects like billiard balls, either exist or don't exist.

If they exist, we know that they exist in a particular location and that they have the property of either moving or being still such that both their velocity and their position could be measured exactly, provided we had the right tools to do the measuring.

In the world of the electron we find that particles, like electrons, do not actually exist in the same way that we think of a billiard ball existing.

In meccanica quantistica ad una particella in moto si associa un'onda

La materia (piccola e veloce) si comporta come una radiazione



Louis de Broglie

de Broglie Wavelength

The **wavelength** of a particle, given by

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

where h is **Planck's constant** and p is the **momentum**.

In the nonrelativistic limit, this can be written

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

Lunghezza d'onda di de Broglie

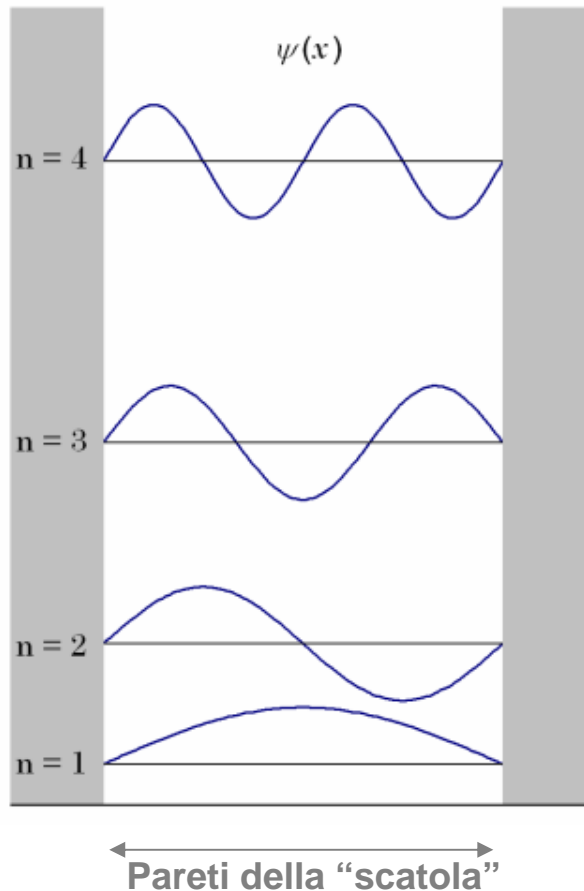
where m is the particle **mass** and v is the **velocity**.



Confinamento quantico



Erwin Schrodinger



Una particella quantistica (ad es. un elettrone) confinata in una “scatola” è descritta da funzioni d’onda specifiche ed assume *livelli discreti di energia*

Effetti di confinamento nel moto di un elettrone attesi per “scatole” di dimensioni nanometriche!!

Per un elettrone:

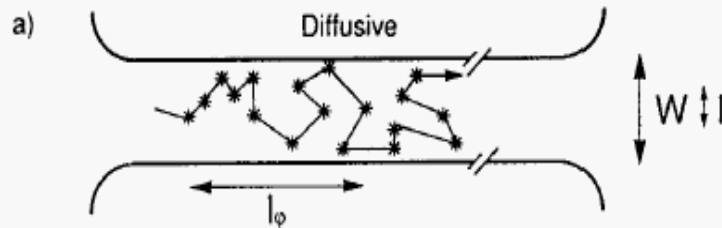
$$\lambda_{dB} = h/p \sim 7 \times 10^{-4} / v \text{ [m/s] in nm}$$

($v_{term} \sim 10^4 - 10^5 \text{ m/s}$, $v_F \sim 10^6 \text{ m/s}$)



La legge di Ohm rivisitata

In un filo di dimensioni ordinarie gli elettroni viaggiano “urtando gli ioni” del metallo



Legge di Ohm:

$$V = R I$$

con $R = \rho L/S$

In un filo nanometrico gli elettroni viaggiano come i fotoni in una fibra ottica

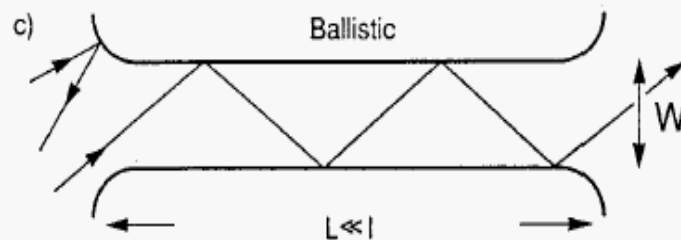


Figure 10.4: Electron trajectories characteristic of the diffusive ($\ell < W, L$), quasi-ballistic ($W < \ell < L$), and ballistic ($W, L < \ell$) transport regimes, for the case of specular boundary scattering. Boundary scattering and internal impurity scattering (asterisks) are of equal importance in the quasi-ballistic regime. A nonzero resistance in the ballistic regime results from backscattering at the connection between the narrow channel and the wide 2D regions. Taken from H. Van Houten et al. in “Physics and Technology of Submicron Structures” (H. Heinrich, G. Bauer and F. Kuchar, eds.) Springer, Berlin, 1988.

Ogni elettrone che entra esce!

La resistenza non dipende dalla lunghezza!

Guide d'onda elettroniche

In the bulk, classically we have:

$$\mathbf{J} = n e \mathbf{v}$$

1. At $T=0$ only the portion of electrons eV/E_F is involved in the transport process

2. Fermi velocity must be considered:

$$v_F = \sqrt{2E_F/m};$$

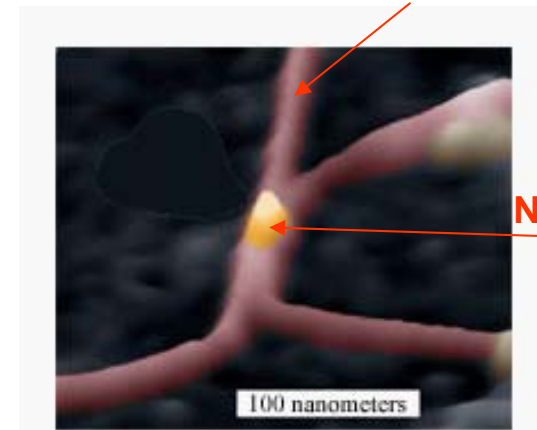
3. $n \propto \int g(E)dE$; in the 1-D case $\propto \sqrt{E_F}$

$$I = eV/E_F e \sqrt{2E_F/m} \sqrt{2m E_F}/h = 2 e^2 V/h$$

Conductivity in an ideal 1DEG structure:

$$G_{1D} = i/V = 2 e^2/h$$

Si potranno realizzare transistors in cui si controlla il passaggio di un *singolo* elettrone alla volta → rapidità operazioni, risparmio di potenza

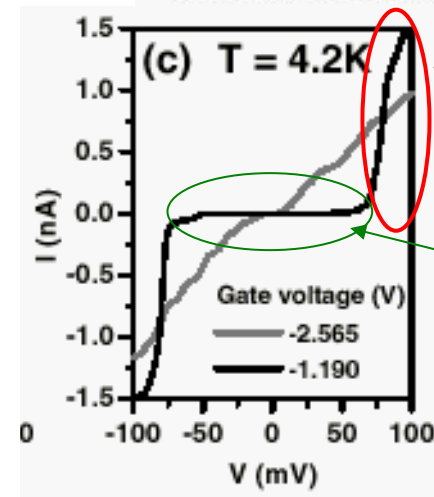


Nanotubo di carbonio

Nanoparticella d'oro

100 nanometers

A tiny speck of gold positioned between two parallel carbon nanotubes forms a transistor that forwards one electron at a time. These single electron transistors could be used to make extremely small, low-power logic circuits.



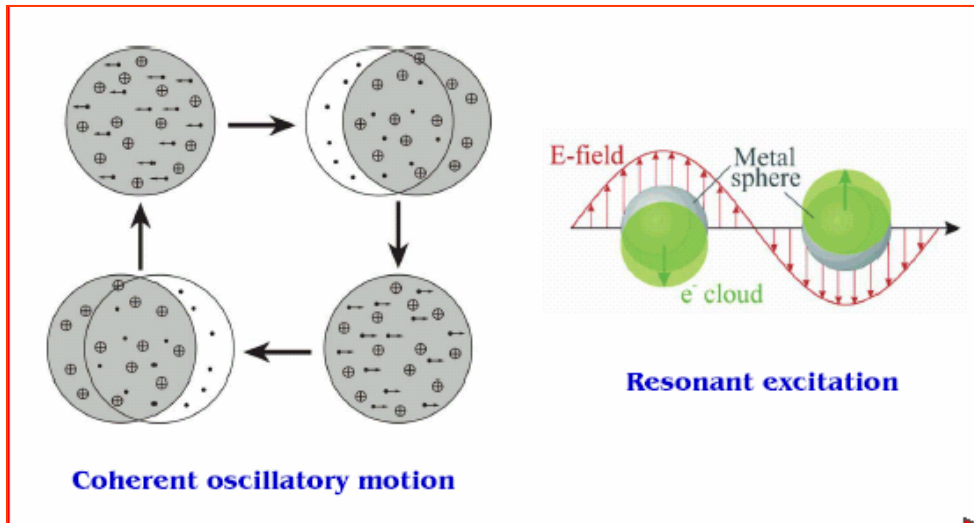
und University

Passa la carica

Non passa la carica

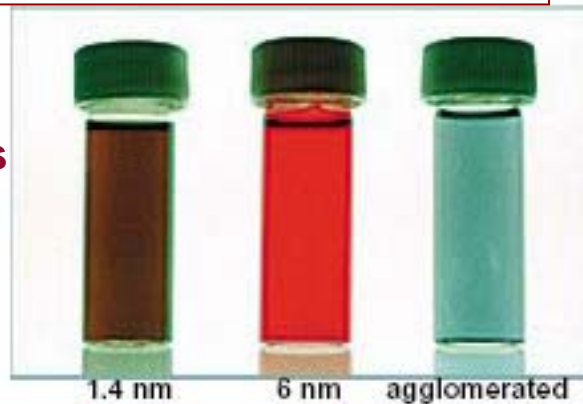
Il colore dell'oro I

Risonanze plasmoniche



Gli elettroni liberi del metallo si muovono *tutti coerentemente* con l'onda elettromagnetica di eccitazione → **risonanze plasmoniche**

Au nanoparticles in solution



Gold Building Blocks

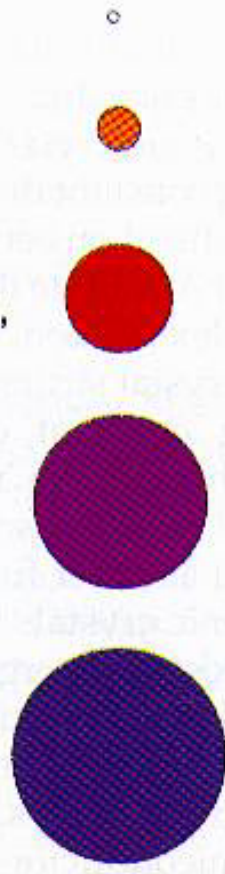
Atoms:
colorless, 1 Å

Gold clusters:
orange, nonmetallic,
<1 nm

Gold nanoparticles:
3–30 nm, red, metallic,
“transparent”

Gold particles:
30–500 nm
metallic, turbid,
crimson to blue

Bulk gold film



Il colore dell'oro II

a) Il vaso di Licurgo spiegato

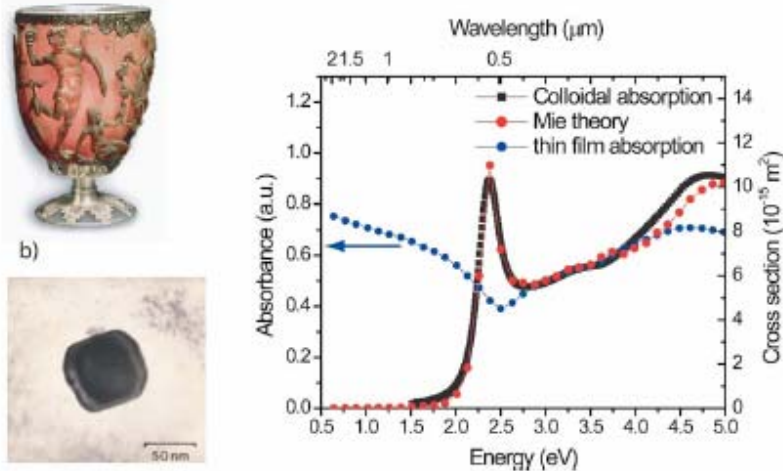
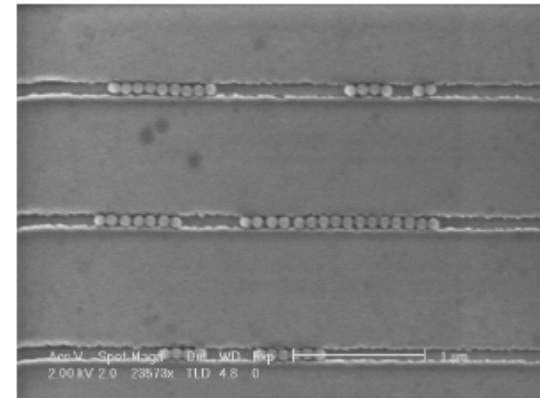
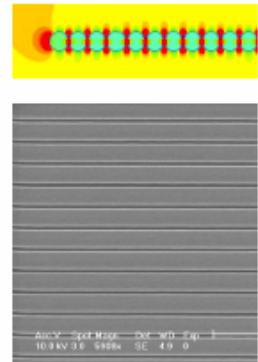


FIG. 1. (Color online) (a) The Lycurgus glass cup, demonstrating the bright red color of gold nanocrystals in transmitted light. (b) scanning electron microscopy (SEM) image of a typical nanocrystal embedded in the glass (courtesy of the British museum). (c) Calculated absorption spectrum of a thin gold film (blue dots) and of 30-nm Au nanoparticles in water (red dots) using classical electromagnetic theory. A measured absorption spectrum of an aqueous solution of 30-nm Au colloids (black dots) shows good agreement with the theory.

Un possibile dispositivo

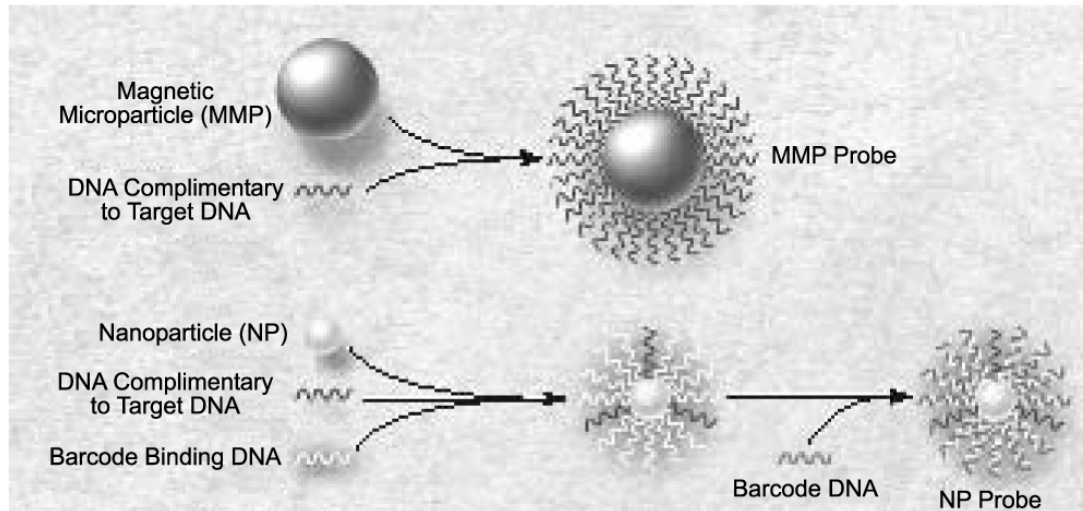
Final goal: surface plasmon nanophotonic waveguides



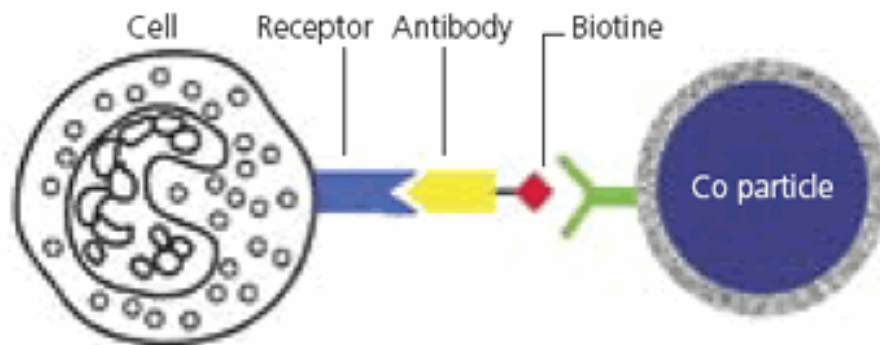
Plasmonics: energy transfer and confinement of light below the diffraction limit

Si pensa di creare nuovi dispositivi per guidare e manipolare la luce visibile ($\lambda \sim 500 \text{ nm}$) sulla scala spaziale delle nanoparticelle ($\sim 10\text{-}50 \text{ nm}$!)
→ condizionamento e guida della luce estremamente efficiente

Marcatori per diagnostica medica



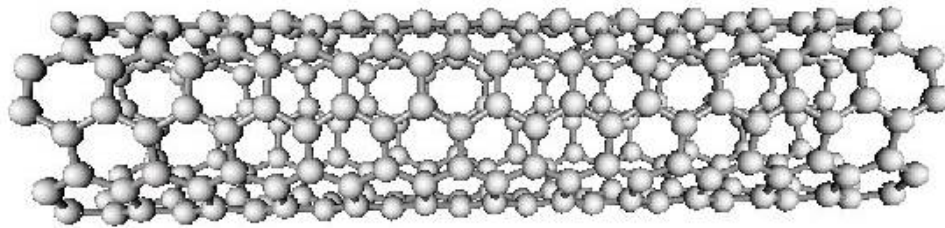
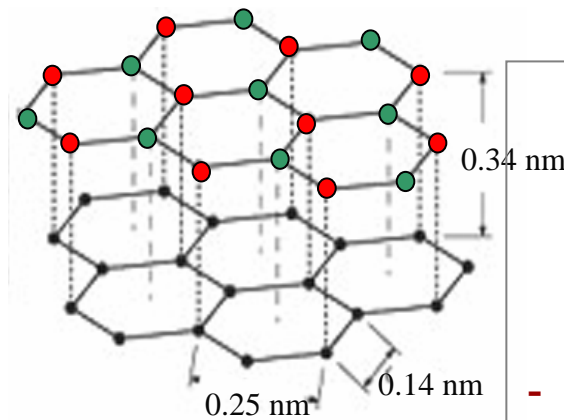
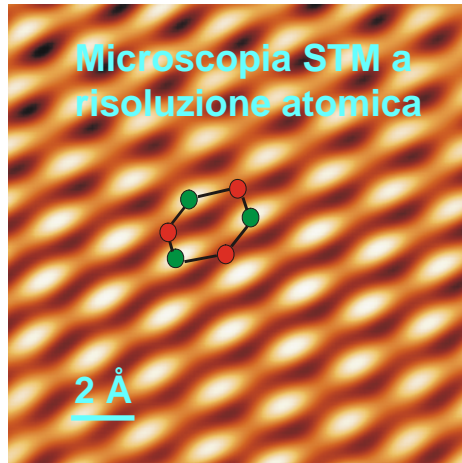
Le nanoparticelle possono essere legate, tramite funzionalizzazione, a DNA o altre entità biomolecolari



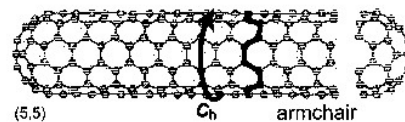
I sistemi biomolecolari “trasportano” la nanoparticella in un sito selezionato e lì la ancorano: il sito viene “marcato”!

Numerose applicazioni della nanotecnologia si rivolgono alla biomedicina!

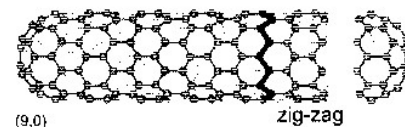
Il meraviglioso mondo dei nanotubi



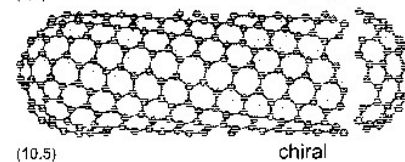
“armchair”



“zig-zag”



“chiral”



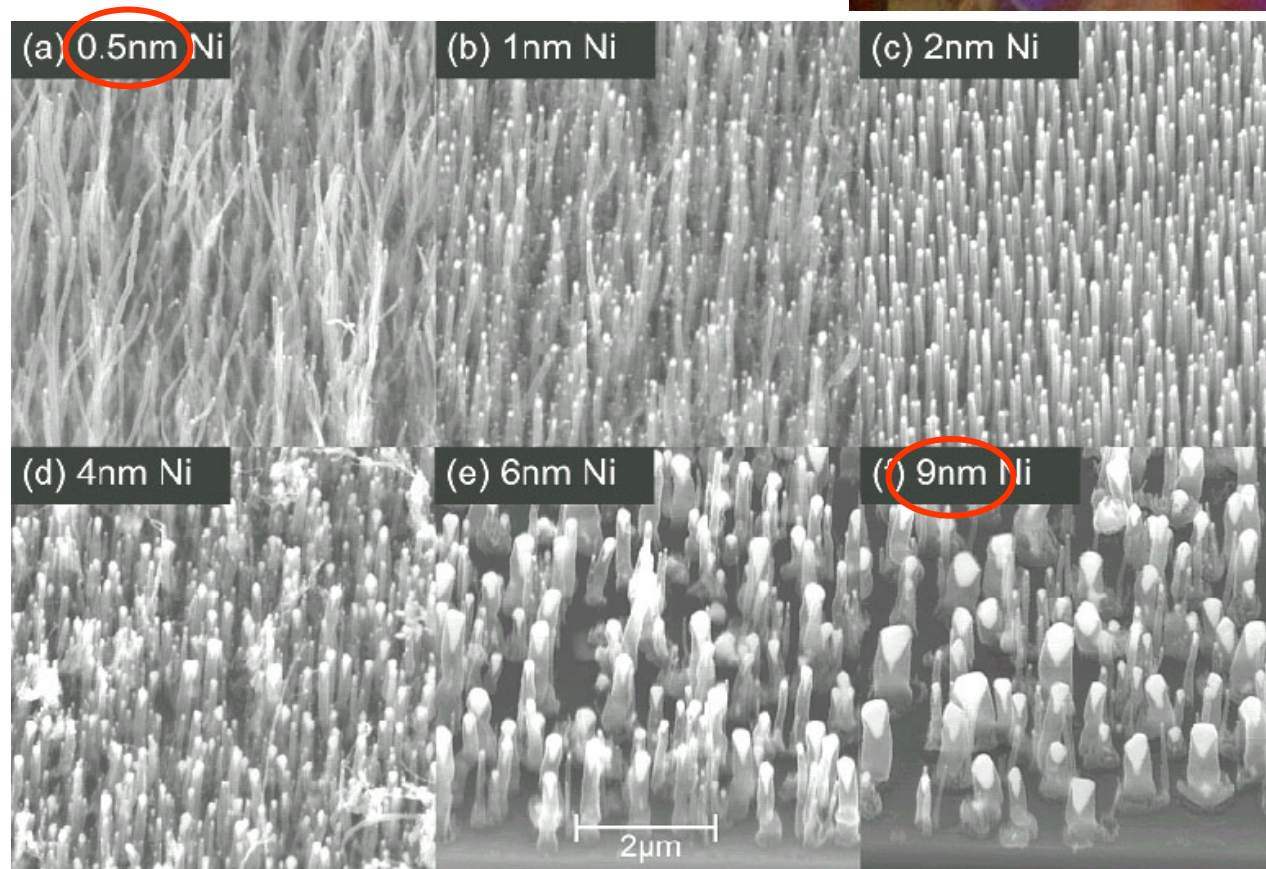
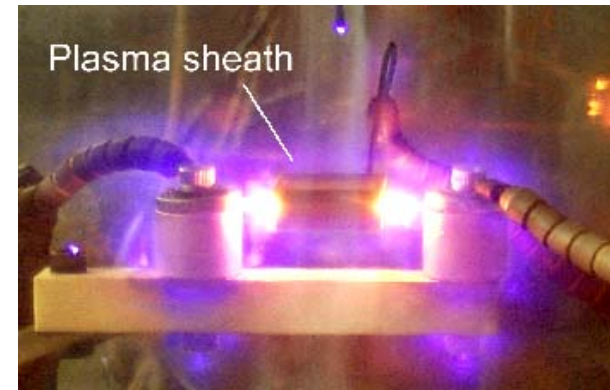
Ricetta per nanotubi di carbonio:

- Prendete un foglio di grafite
- Avvolgetelo a forma di cilindro
- Troverete vari modi per “richiudere” il foglio



Fabbricare nanotubi

Esistono metodi (basati su scariche elettriche, tipo saldatrice ad arco) per produrre nanotubi in modo controllato ed efficiente



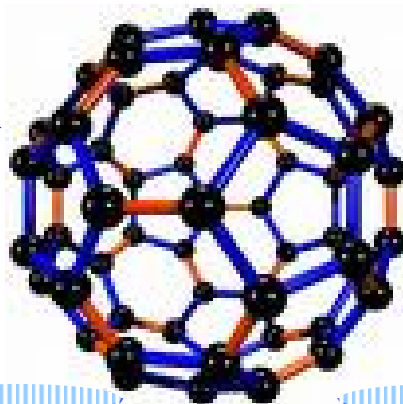
Nanostrutture di carbonio



Curl, Kroto, Smalley, 1996

I nanotubi sono parenti stretti di un'altra famosa nanostruttura fatta di atomi di carbonio, il **buckminster fullerene**

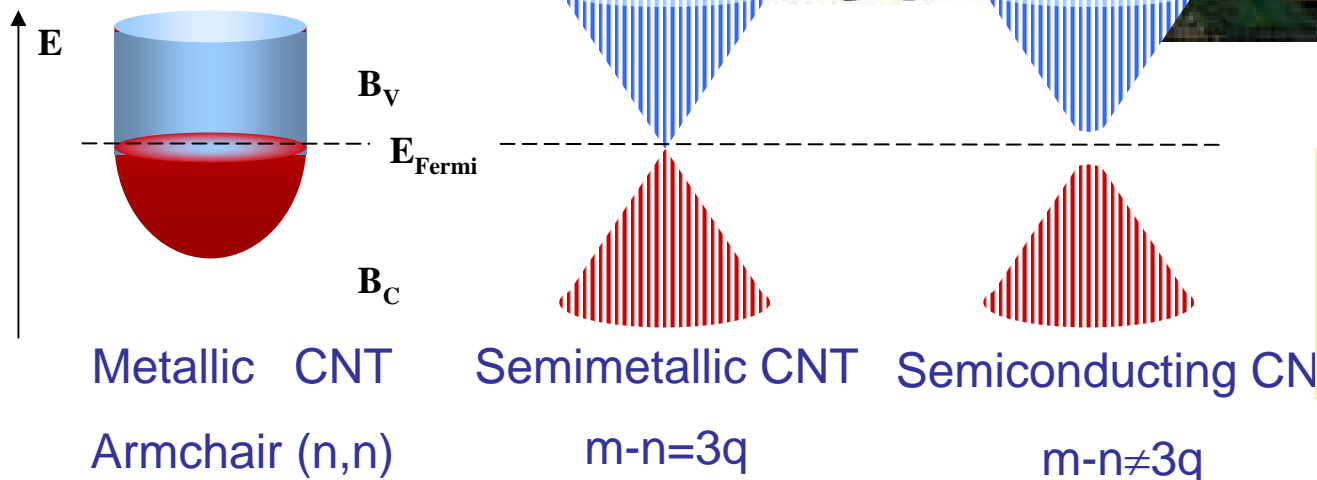
Fullerene:
60 atomi di carbonio organizzati in forma di una sfera cava



Tensostruttura di Buckminster Fuller



Spaziosa, leggera e robusta



Nanotubi di carbonio possono essere semiconduttori



Electronica con nanotubi

Figure 25: A carbon nanotube field effect transistor (CNTFET). The nanotube (red) is located on top of two platinum contacts (yellow). The back-gate-stack (blue) is formed by a silicon dioxide dielectric on top of a silicon wafer (colored AFM-image taken from [57]).

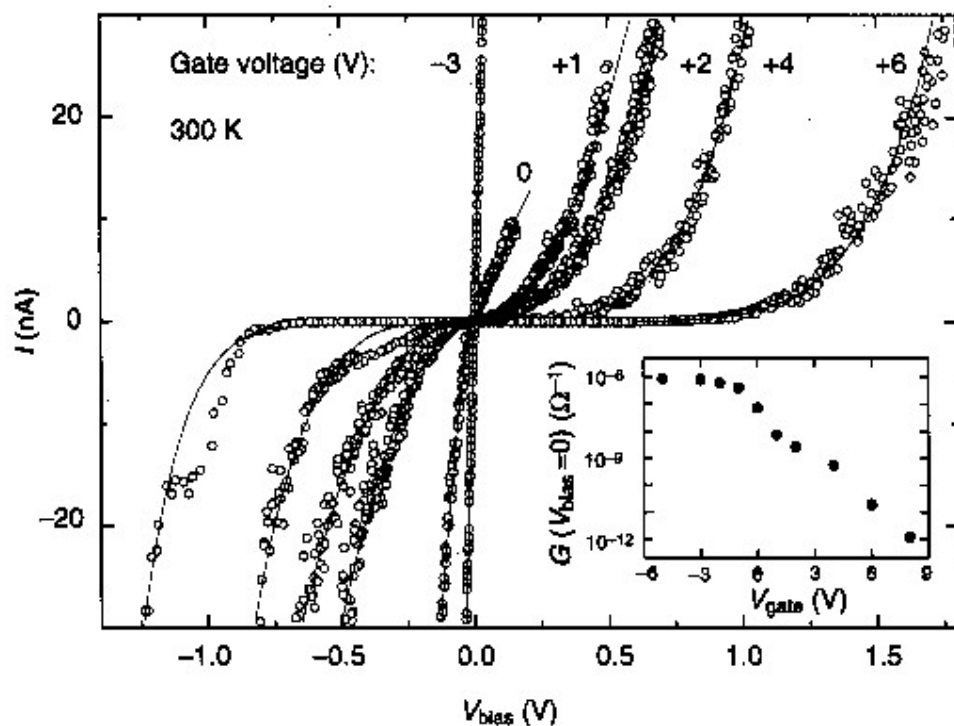
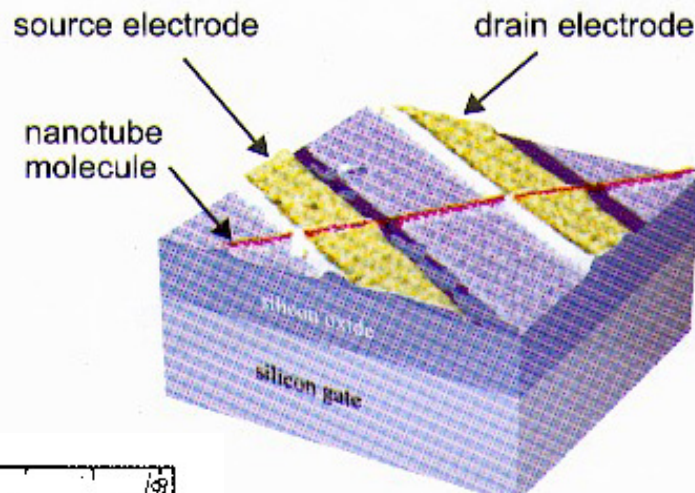


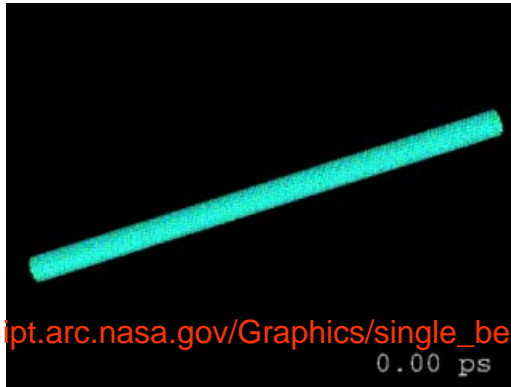
Figure 26: The current-voltage characteristics of a semiconducting single-wall carbon nanotube for different gate voltages (see Figure 25). For large positive gate voltages the conductance of the tube is very small for source-drain biases less than approximately 1 V. Changing the gate voltage to negative values increases the conductivity steadily until saturation is reached at approximately -3 V (see insert). The maximum conductivity is comparable to the values found for metallic tubes measured in the same experiment (taken from [57]).

Si possono ipotizzare applicazioni elettroniche con nanotubi al posto del silicio (in approcci *bottoms-up*)

Piccoli, ma robusti!

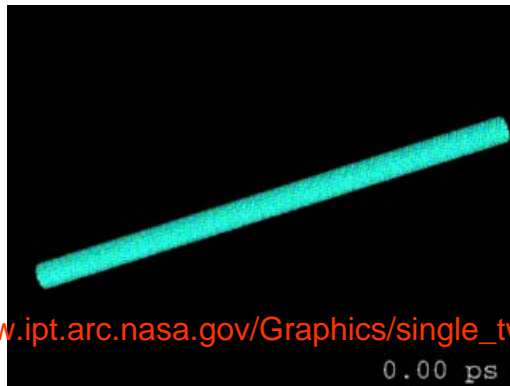
Sono gusci cilindrici, hanno eccellente elasticità e resistenza!

Nanotubi piegati

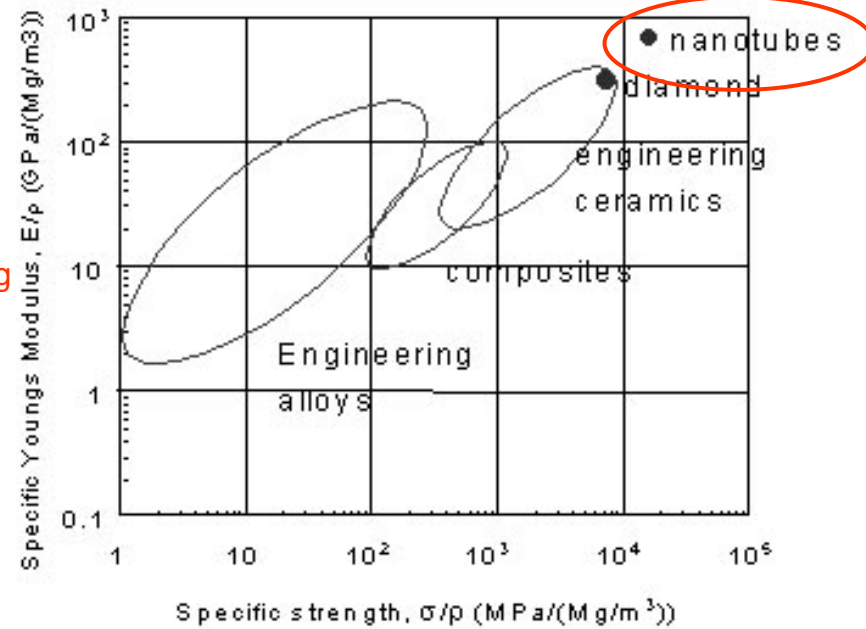


http://www.ipt.arc.nasa.gov/Graphics/single_bend_320.mpg

Nanotubi attorcigliati



http://www.ipt.arc.nasa.gov/Graphics/single_twist_320.mpg

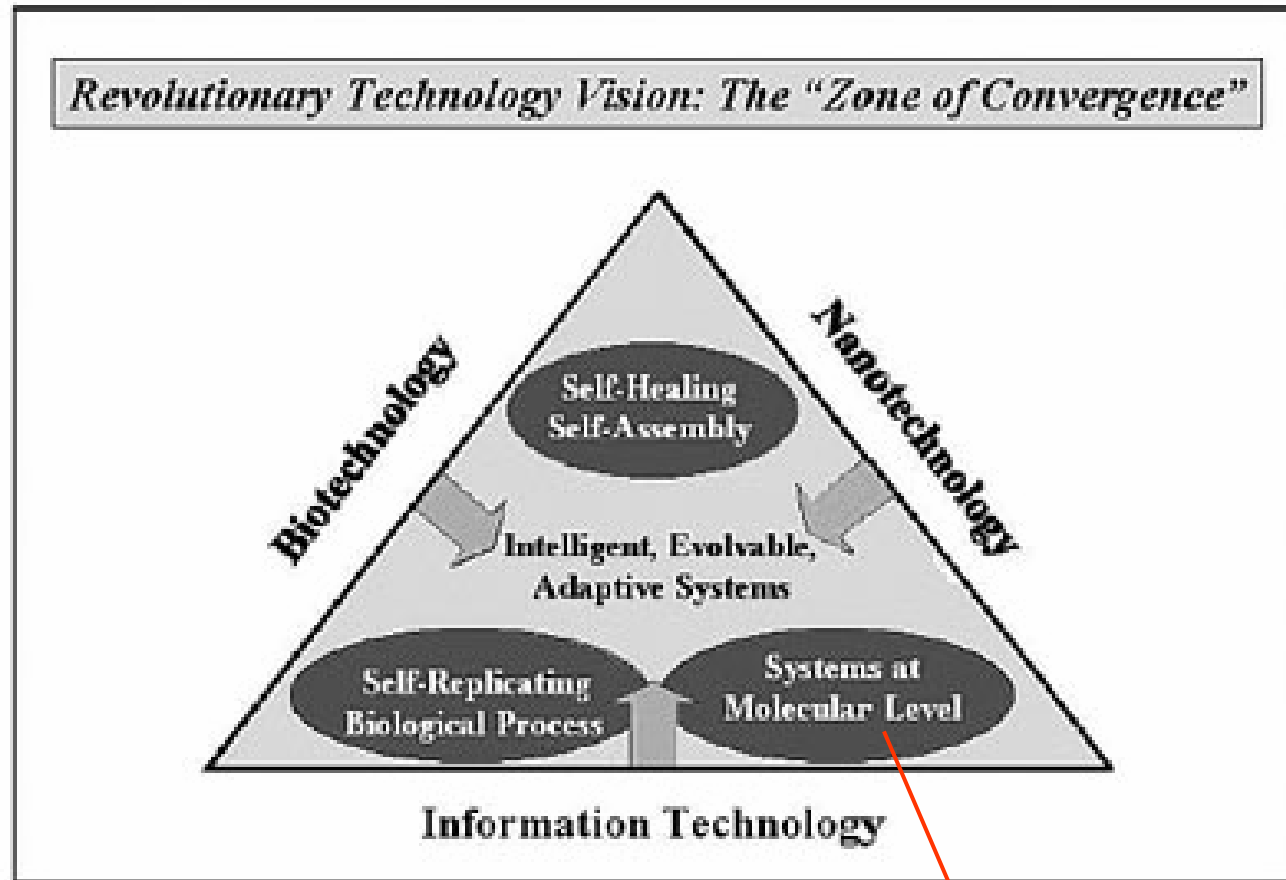


Comparison of Specific Young's Modulus vs. Specific Strength for nanotubes and other engineering materials

**Applicazioni nanomeccaniche (NEMS)
Nuovi materiali nanocompositi**



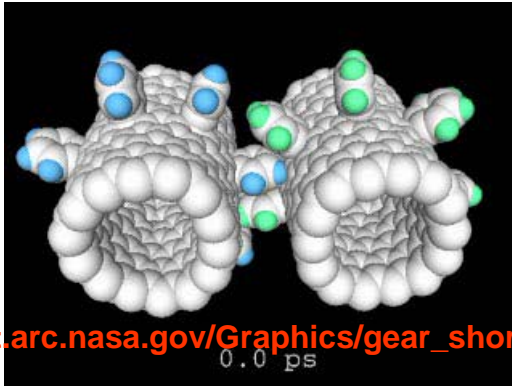
Le potenzialità molecolari



**Enormi potenzialità associate ad ingegneria molecolare
(tuttora da esplorare e realizzare praticamente)**

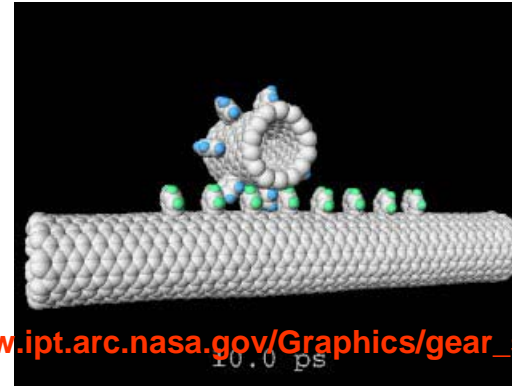
Nanomacchine molecolari

Progetto di ingranaggio molecolare



http://www.ipt.arc.nasa.gov/Graphics/gear_short_rt1.mpg

Progetto di cremagliera molecolare



http://www.ipt.arc.nasa.gov/Graphics/gear_shaft1.mpg

Enormi possibilità future per la realizzazione di **nanorobot** molecolari da usare, ad esempio, come strumenti di diagnostica e terapia di organismi viventi

Oppure nel campo della produzione di energia

Oppure...

- Cosa è la nanotecnologia e cosa è piccolo?
- Nanotecnologia in natura (e nell'arte antica)
- Quali sono le forze principali che spingono la ricerca nel settore?
- Come si fa a vedere il piccolo?
- Alcune nuove tecniche di nanofabbricazione
- Confinamento quantico e alcune nuove funzionalità:
 - in elettronica;
 - in ottica;
 - nanotubi;
 - macchine molecolari

- **Conclusioni**

Conclusioni

Beh, 47 anni dopo il discorso di Richard Feynman possiamo concludere che, ancora, c'è molto, molto spazio nel piccolo, da esplorare e da riempire con nuove ricerche ed applicazioni



Grazie per l'attenzione!!

**Se siete interessati, contattami come e quando volete!
Francesco Fuso, tel 0502214293, e-mail: fuso@df.unipi.it
<http://www.df.unipi.it/~fuso/nanolito>**

Credits

<http://www.ipt.arc.nasa.gov>

<http://www.nanoengineer-1.com>

<http://www.omicron.de>

<http://www.sciencemuseum.org.uk/antenna/nano/>

<http://www.ntmdt.ru>

<http://nanocold.df.unipi.it>

<http://www.venetonanotech.it>

<http://www.nni.org>

<http://www.zyvex.com>

<http://www.veeco.com>

<http://www.nanopicoftheday.org>

<http://www.sfgate.com>

R.Waser *Nanoelectronics and information technology* (Wiley-VCH, 2003)

M.Ratner, D.Ratner *Nanotechnology: the next big idea* (Prentice-Hall, 2003)

B.Bhushan *Handbook of nanotechnology* (Springer-Verlag, 2004)

Parte del materiale è tratto dai seminari per il corso di Fisica delle Nanotecnologie **Laurea Specialistica in Scienza dei Materiali** all'Università di Pisa, a cui si accede dal triennio di Fisica, curriculum Fisica dei Materiali, e dal triennio di Chimica